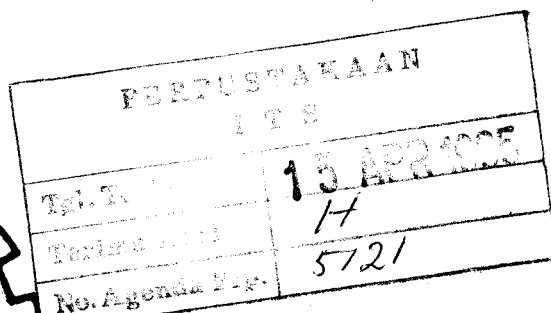
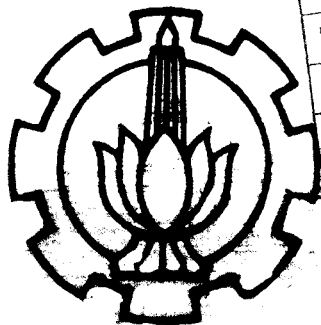


3100096008012

**TUGAS AKHIR (NA.1701)**  
**ANALISA PERBANDINGAN**  
**FATIGUE CORROSION**  
**BAJA LUNAK DENGAN BAJA KEKUATAN TINGGI**



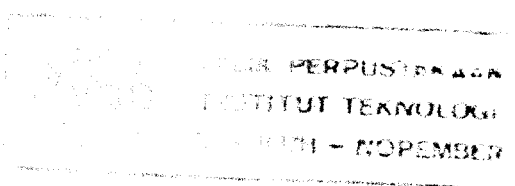
RSke  
620.112 G  
Tri  
a-1  
1995

**OLEH :**

**BEKTI TRILESTARININGTIAS**

**NRP : 4904100336**

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN**  
**FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**  
**1995**

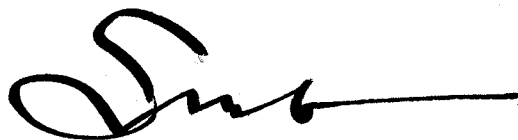


LEMBAR PENGESAHAN

Surabaya, Maret 1995

Mengetahui,

Dosen Pembimbing Tugas Akhir

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Soewelfy', with a long horizontal stroke extending to the right.

( Ir. Soewelfy, M.Eng. )



# FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS

## JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

### TUGAS - AKHIR.

No. : 13/PT12.PK.2/M/94.

NOMOR/MATA KULIAH : TP.1703 /TUGAS AKHIR.  
NAMA MAHASISWA : BEKTI TRIESTAPININGTAS...  
NOMOR POKOK : 4904100336.....  
TANGGAL DIBERIKAN TUGAS : 28 Pebruari 1994.....  
TANGGAL SELESAI TUGAS : 24 Desember 1994.....  
DOSEN PEMBIMBING : Ir. Soewefy, M.Eng.....

TEMA/URAIAN/DATA-DATA YANG DIBERIKAN :

"ANALISA PERBANDINGAN FATIGUE KOROSI BAJA LUNAK (MILD STEEL) DENGAN BAJA TEGANGAN-  
TINGGI (HIGH TENSILE)"

sOn

Surabaya, .18..A.p.r.i.l.... 19.94.

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN I.T.S.  
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN.

Dibuat rangkap 4 :

1. Mahasiswa Ybs.
2. Dekan (mohon dibuatkan SK).
3. Dosen Pembimbing (Merah).
4. Arsip Kujur (Kuning).



Signature: *[Handwritten Signature]*  
j i t n o.

NIP. 150 532 029.

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS  
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

PROSES VERBAL UJIAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

1. Nama mahasiswa : .. Bakti Trilestariningtyas ..  
2. N.R.P. : .. 4904100336 ..  
3. Semester : .. ~~Genap~~ / Genap \*) 19 ~~94~~ ... / 1995 ...  
4. Hari / Tanggal : .. Selasa, 14 Maret 1995 ..  
5. Waktu yang disediakan : 90 (sembilanpuluh) menit  
6. Waktu ujian : Pukul . 10.30. .... s/d Pukul . 12.00. ....  
7. Tim penguji :

N a m a

Tanda Tangan

Ketua

Ir. P. Andrianto

Anggota

1. Ir. Soewefy, M.Eng

2. Ir. P.M. Pamunggal, Ph.D

3. Ir. Asjhar Idrus, MSc, MEE

4. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng

8. Kejadian-kejadian penting selama ujian berlangsung :

9. Perbaikan yang harus dilakukan (maksimum 2 minggu) :

Perbaiki Lembaran cetak

Surabaya, 14 Maret  
Ketua Tim Penguji

19 95

Ir. P. Andrianto

## ABSTRAK

*Material yang telah mempunyai retak apabila diberi beban berulang, retak tersebut akan menjalar dengan cepat sampai batas tertentu dimana struktur akan mengalami kegagalan.*

*Selama proses kelelahan banyak faktor yang berpengaruh didalamnya, antara lain lingkungan dan kondisi beban. Apabila faktor beban bersamaan dengan lingkungan yang korosif maka terbentuklah keadaan yang disebut fatigue korosi, yang mengakibatkan struktur gagal pada tingkat tegangan jauh dibawah tegangan statik yang dapat membuatnya pecah.*

*Sifat-sifat material mempunyai pengaruh terhadap sifat kelelahan. Dengan membandingkan dua material yang memiliki kekuatan tarik yang tidak sama akan diperoleh gambaran respon dari masing-masing material terhadap pembebanan berulang dan lingkungan korosif*

*Untuk mendapatkan kondisi korosif, dilakukan pengujian dengan menyemprotkan air laut pada cycle-cycle tertentu. Dari pengujian ini didapatkan laju perambatan retak,  $da/dN$  untuk dua kondisi yang berbeda (air laut, udara) pada material yang berbeda. Dengan memakai persamaan Paris-Edorgan akan didapat rumus empiris untuk material dengan cacat tepi.*

# KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT, atas terselesaikannya tugas akhir ini.

Tugas akhir dengan judul "ANALISA PERBANDINGAN FATIGUE CORROSION PADA BAJA LUNAK DENGAN BAJA KEKUATAN TINGGI" disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS .

Menyadari bahwa tugas ini tidak dapat terselesaikan tanpa bantuan dan pertolongan orang lain, maka dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih yang amat banyak kepada :

1. Bapak Ir. Soewefy, M.Eng. selaku dosen pembimbing, atas kebaikan beliau dalam memberikan bimbingan, saran serta instruksi untuk menyelesaikan tulisan ini.
2. Bapak Ir. Soejitno dan Ir. Zubaydi, M.Eng. selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan ITS.
3. Bapak, Ibu, kakak serta adikku tercinta, yang telah banyak memberikan dorongan baik moril maupun materiil hingga terselesaikannya tulisan ini.
4. Bapak Ir. Paulus Andrianto selaku dosen wali.
5. Seluruh pimpinan dan karyawan Laboratorium Konstruksi dan Produksi FTK ITS antara lain : Bapak Ir. Triwilaswandio, M.Sc.,

Bapak Ir. Heri Supomo, M.Sc., Bapak Mudjito, Mas Naryo, Pak Hardiman, Mas Yanto, dan Mas Didik yang telah banyak membantu selama pengujian.

6. Rekan-rekan se-angkatan, se-nasib, se-perjuangan P-30 atas dorongan, saran dan bantuan. Semoga kita semua sukses.
7. Sahabat-sahabatku tercinta yang dengan sukarela membantu dan menemani melintasi hari-hari yang lalu. Terimakasih untuk semua yang telah kalian beri.
8. Semua pihak yang telah banyak membantu selama pengerjaan tulisan ini yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Dalam menyusun tulisan ini, penulis telah berusaha sebaik-baiknya, namun demikian kami sadar bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis mengharapkan sumbangan kritik dan saran dari semua pihak demi pengembangan pengetahuan dan penelitian selanjutnya. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat berguna untuk masyarakat perkapalan umumnya dan penulis pribadi khususnya serta semua pihak.

Surabaya, Maret 1995

Penulis

Bekti Trilestariningtias  
NRP. 4904100336

# DAFTAR ISI

**Lembar Pengesahan**

**SK Tugas Akhir**

**Abstrak** i

**Kata Pengantar** ii

**Daftar Isi** iv

**Daftar Tabel** viii

**Daftar Gambar** ix

**Daftar Notasi** xii

**I. PENDAHULUAN** I-2

I.1 Latar Belakang masalah I-2

I.2 Batasan Masalah I-4

I.3 Metodologi Penelitian I-5

**II. BAJA** II-1

II.1 Diagram Fase Besi-Karbon II-1

II.2 Klasifikasi Baja II-4

II.3 Baja Lunak II-5

II.4 Baja Diperkuat II-5

II.4.1 Baja Kekuatan Tinggi Tanpa Perlakuan

Panas II-7



II.4.2 Baja Kekuatan Tinggi Dengan Perlakuan Panas	II-7
<b>III. KELELAHAN PADA MATERIAL</b>	III-1
III.1 Mekanisme Kelelahan Dan Perambatan	III-1
III.2 Proses Kelelahan	III-4
III.2.1 Penggelinciran Berulang	III-4
III.2.2 Retak Inti (Crack Nucleation)	III-4
III.2.3 Pertumbuhan Retak Mikro (Microcrack Growth)	III-6
III.2.4 Pertumbuhan Retak Makro (Macrocrack Growth)	III-7
III.2.5 Kegagalan Akhir (Final Failure)	III-8
III.3. Perambatan Retak	III-8
III.3.1 Faktor Intensitas Tegangan	III-8
III.3.2 Fracture Toughness ( $K_{Ic}$ )	III-10
III.3.3 Laju Perambatan Retak Menengah	III-12
III.4. Mekanisme Kelelahan	III-15
III.4.1 Pertumbuhan Retak Dan Striation	III-17
III.4.2 Karakteristik Dari Kelelahan-Kepecahan	III-21
 <b>IV. TINJAUAN ASPEK KOROSI</b>	IV-1
IV. Pendahuluan	IV-1
IV.1 Teori Dasar Korosi	IV-1
IV.2 Prinsip Dasar Terjadinya Korosi	IV-4
IV.3 Faktor-Faktor Penyebab Terjadinya Korosi	IV-7
IV.3.1 Sifat-Sifat Material	IV-7

IV.3.2 Faktor Lingkungan	IV-10
<b>V. FATIGUE CORROSION</b>	<b>V-1</b>
V.1 Pendahuluan	V-1
V.2 Stress Corrosion Cracking	V-1
V.2.1 Efek Tegangan	V-2
V.2.2 Waktu Peretakan	V-2
V.2.3 Faktor Metalurgi	V-3
V.3 Stress Corrosion Process	V-4
V.3.1 Tahap Pemicuan	V-4
V.3.2 Tahap Perjalanan Retak	V-6
V.4 Gambaran Miroskopik dan Makroskopik SCC	V-8
V.5 Stress Corrosion Test (SCT), Variabel dan Tujuan Pengetesan	V-10
V.6 Aspek-Aspek Praktis SCC	V-14
V.7 Corrosion Fatigue	V-16
V.7.1 Pengaruh Tegangan Luluh Terhadap Laju Perambatan Retak	V-19
V.7.2 Pengaruh Frekuensi Terhadap laju Perambatan Retak	V-20
V.7.3 Sifat Fatigue Korosi Di Bawah Kondisi Kering	V-21
<b>VI. PELAKSANAAN PENGUJIAN</b>	<b>VI-1</b>
VI.1 Benda Uji (Spesimen)	VI-2
VI.1.1 Material Uji Tarik	VI-2

VI.1.2 Material Uji Dinamis	VI-3
VI.2 Pelaksanaan Pengujian	VI-6
VI.2.1 Kalibrasi beban	VI-6
VI.2.2 Pengujian Statis	VI-8
VI.2.3 Pengujian Dinamis	VI-9
VII. ANALISA	
VIII. KESIMPULAN DAN SARAN	
<b>Daftar Pustaka</b>	
<b>Lampiran</b>	

# DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1      Diagram keseimbangan besi-karbon.
- Gambar 3.1      Tahapan (Mode) dari proses kelelahan.
- Gambar 3.2      Retak kecil yang diperlihatkan lebih awal dari usianya kecuali pada tingkatan low stress.
- Gambar 3.3      Retak untuk pelat tak terbatas.
- Gambar 3.4      Fracture Toughness sebagai fungsi yield stress
- Gambar 3.5      Diagram variasi sigmodial laju perambatan retak  $da/dN$  dengan SIF.
- Gambar 3.6      Model Wood untuk intrasi retak mikro pada pita penggelinciran.
- Gambar 3.7      Dua sistem kontribusi penggelinciran menuju bukaan retak pada cara yang sama menurut Wood.
- Gambar 3.8      Tahap pertumbuhan retak pada permukaan bebas dan penetrasi ke dalam material.
- Gambar 3.9      Dua model untuk mikroplastisitas dan striation.
- Gambar 3.10      Dua bagian kegagalan dan kelelahan.
- Gambar 3.11      Perbedaan antara kegagalan statis dan kegagalan akhir.
- Gambar 3.12      Perpindahan Tensile Mode ke Shear Mode pada material pelat.
- Gambar 3.13      Pertumbuhan retak kelelahan tegak lurus terhadap tegangan utama. Putaran torsi pada poros penggerak menyebabkan retak spiral. Retak berawal dari permukaan lubang.

- Gambar 3.14 Permukaan kepecahan benda uji bertakik.
- Gambar 4.1 Proses terjadinya korosi akibat kimia listrik.
- Gambar 4.2 Pengaruh kedalaman air laut terhadap oksigen, temperatur, pH dan salinitas.
- Gambar 4.3 Pengaruh kedalaman oksigen terhadap korosi baja.
- Gambar 4.4 Pengaruh temperatur terhadap laju korosi.
- Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan aliran terhadap korosi baja.
- Gambar 5.1 Komposisi kurva relatif ketahanan SCC untuk stainless steel dalam 42% Magnesium Clorida.
- Gambar 5.2 Pengaruh kandungan karbon terhadap kecepatan korosi.
- Gambar 5.3 Peran utama slip step dalam peretakan peka lingkungan.
- Gambar 5.4 Mekanisme absorpsi oleh ion Hidrogen.
- Gambar 5.5 a. Ujung retak (900x). Intergranular crack growth.  
b. Permukaan patah (14000x) Grain Boundary facets.
- Gambar 5.6 Hasil pengujian stress corrosion life.
- Gambar 5.7 Hasil pengujian retak korosi tegangan (SCC).
- Gambar 5.8 Kerentanan terhadap SCC dengan pengukuran laju perambatan retak.
- Gambar 5.9 Grafik pertumbuhan retak korosi tegangan.
- Gambar 5.10 Laju pertumbuhan retak fatigue dari 13Cr-8Ni-2Mo Stainless Steel pada air laut dan udara normal.
- Gambar 5.11 Data laju pertumbuhan retak fatigue korosi.
- Gambar 5.12 Data perambatan retak fatigue korosi sebagai fungsi dari pengujian frekuensi.
- Gambar 5.13 Kecepatan perambatan retak fatigue korosi pada pipa x-65 line pada 3,5% air laut.

- Gambar 5.14      Perlambatan laju perambatan retak dibawah kondisi lingkungan basah-kering untuk baja A514 Grade F.
- Gambar 5.15      Pengaruh air laut terhadap perambatan retak pada baja
- Gambar 6.1        Spesimen untuk uji tarik.
- Gambar 6.2        CT Spesimen.
- Gambar 6.3        Beban yang dipakai.
- Gambar 6.4        Detail retak dan cara pembuatannya.
- Gambar 6.5        Bentuk spesimen yang dipakai.
- Gambar 6.6        Grafik kalibrasi beban.
- Gambar 7.1        Grafik laju perambatan retak spesimen I pada kondisi udara normal dan air laut.
- Gambar 7.2        Grafik laju perambatan retak spesimen II pada kondisi udara normal dan air laut.
- Gambar 7.3        Grafik perbandingan laju perambatan retak spesimen I dan II pada kondisi air laut.

## DAFTAR NOTASI

$a$	=	Panjang retak.
$a_0$	=	Panjang retak awal.
$a(t)$	=	Panjang retak pada saat waktu $t$ .
$\alpha$	=	Rasio panjang retak dengan lebar, $a/W$ .
$B$	=	Tebal.
$C$	=	Konstanta persamaan Paris-Erdogan.
CTOD	=	Displasemen bukaan ujung retak.
$da/dN$	=	Laju/kecepatan penjalaran retak.
$D(t)$	=	$C$ untuk test 3 % sodium Klorida.
$\Delta$	=	Displasemen.
$\Delta(t)$	=	Displasemen pada saat waktu $t$ .
$\Delta a$	=	Pertambahan panjang retak.
$\Delta K$	=	Rentang faktor intensitas tegangan.
$\Delta K_0$	=	Batas bawah grafik sigmoidal perambatan retak.
$\Delta N$	=	Pertambahan siklus beban.
$\Delta P$	=	Rentang beban.
$\Delta \sigma$	=	Rentang tegangan.
$E$	=	Modulus Young.
$\varepsilon$	=	Regangan.
$K$	=	Faktor intensitas tegangan.
$K_c$	=	Fracture toughness.
$K_{min}$	=	Faktor intensitas tegangan minimum.

$K_{max}$	=	Faktor intensitas tegangan maksimum.
$K_I$	=	Faktor intensitas tegangan pada mode I.
$K_{II}$	=	Faktor intensitas tegangan pada mode II.
$K_{III}$	=	Faktor intensitas tegangan pada mode III.
$m$	=	Konstanta eksponen persamaan Paris-Erdogan.
$N$	=	Jumlah siklus beban.
$P$	=	Beban.
$P(t)$	=	Beban pada saat waktu $t$ .
$P_a$	=	Amplitudo beban.
$P_m$	=	Beban rata-rata.
$P_{max}$	=	Beban maksimum.
$P_{min}$	=	Beban minimum.
$R$	=	Rasio beban, $P_{min}/P_{max}$ .
$\sigma$	=	Tegangan.
$\sigma_{app}$	=	Tegangan aplikasi.
$\sigma_c$	=	Tegangan kritis di depan ujung retak.
$t$	=	Waktu.
$\tau$	=	Tegangan geser.
$W$	=	Lebar.



## DAFTAR TABEL

Tabel 6.1	Kalibrasi Beban
Tabel 6.2	Hasil Uji Tarik
Tabel 6.3	Hasil Pengujian Spesimen I (SS41) Pada Kondisi Udara Normal
Tabel 6.4	Hasil Pengujian Spesimen II (C1045) Pada Kondisi Udara Normal
Tabel 6.5	Hasil Pengujian Spesimen III (SS41) Pada Air Laut / 500 Cycle
Tabel 6.6	Hasil Pengujian Spesimen IV (C1045) Pada Air Laut / 500 Cycle
Tabel 6.7	Perhitungan Stress Intensity Factor Spesimen I (Udara Normal)
Tabel 6.8	Perhitungan Stress Intensity Factor Spesimen II (Udara Normal)
Tabel 6.9	Perhitungan Stress Intensity Factor Spesimen III (Pada Air Laut / 500 Cycle)
Tabel 6.10	Perhitungan Stress Intensity Factor Spesimen IV (Pada Air Laut / 500 Cycle)
Tabel 6.11	Laju Pertambahan Retak Spesimen I
Tabel 6.12	Laju Pertambahan Retak Spesimen II
Tabel 6.13	Laju Pertambahan Retak Spesimen III
Tabel 6.14	Laju Pertambahan Retak Spesimen IV

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1. LATAR BELAKANG.

Perkembangan struktur atau konstruksi di laut sangat dipengaruhi kondisi lingkungan laut. Karena dalam pengoperasiannya, kondisi laut sangat berpengaruh terhadap kondisi struktur. Komposisi dari elemen air laut dan beban lingkungan laut yang diterima struktur adalah hal yang berpengaruh. Beban lingkungan laut ini dapat dibagi menjadi *beban statis* dan *beban dinamis*.

Beban Statis adalah beban yang besar dan arahnya konstan, demikian pula lendutan dan tegangan yang dihasilkan adalah konstan.

Beban Dinamis adalah beban yang besar dan arahnya berubah, demikian pula lendutan dan tegangan yang dihasilkan berubah-ubah. Beban dinamis dapat dibedakan menjadi *beban impact* dan *beban kelelahan*.

Pada beban impact tegangan dan defleksi yang dihasilkan lebih besar dari gabungan beban statis yang bersamaan, faktor ini disebut faktor impact. Selain oleh beban impact, besarnya defleksi dan tegangan juga dipengaruhi sifat fisik material dan kecepatan pembebanan. Beban mendadak seperti ini, seringkali menyebabkan kerusakan struktur.

Kelelahan adalah suatu proses perubahan-perubahan struktur dasar yang mengalami tegangan berulang. Yang perlu diperhatikan pada kelelahan struktur adalah pada kenyataan retakan lelah biasanya dimulai dari permukaan bebas. Mekanisme pembentukan awal retak lelah tersebut terjadi pada permukaan, pada intrusi dan ekstrusi pita penggelinciran. Sehingga kondisi permukaan sangat mempengaruhi kegagalan kelelahan.

Adanya lingkungan laut yang bertindak sebagai pemicu serangan korosif pada suatu struktur yang biasanya menimbulkan lubang pada permukaan. Secara teoritis lubang yang terjadi berfungsi sebagai takik. Apabila serangan korosif ini diikuti dengan adanya pembebanan berulang maka akan dihasilkan penurunan usia kelelahan yang lebih besar dibanding akibat serangan korosif saja.

Adanya tegangan berulang pada pembebanan dinamis akan menimbulkan kerusakan lapisan oksida permukaan setempat yang menyebabkan terjadinya lubang-lubang korosif lebih banyak dibandingkan akibat serangan korosif tanpa pembebanan berulang. Tegangan yang bekerja di sekitar lubang menyebabkan terkikisnya produk korosi sehingga dasar lubang korosi menjadi lebih anodik daripada daerah sekitarnya. Akibatnya korosi semakin bergerak ke dalam, dipercepat lagi dengan terlepasnya lapisan oksida akibat regangan berulang. Sehingga akan menghasilkan konsentrasi tegangan yang dapat menimbulkan retakan.

Jenis baja yang dipakai untuk suatu struktur mempunyai sifat ketahanan korosi yang berbeda. Ditinjau dari segi metalurgi, baja yang

mengalami deformasi berat, butiran-butirannya akan mengalami perubahan bentuk dan struktur mikro akan kacau sehingga material akan semakin reaktif terhadap lingkungan elektrolis. Sehingga pada properti dari baja dengan multifase sangat tergantung pada jumlah, distribusi, ukuran, bentuk, dan kekuatan fase karena perbedaan dua fase mempunyai karakteristik elektrokimia berbeda yang akan memicu adanya korosi.

Ditinjau secara mikrostruktur, dalam baja terdapat sel galvanik yaitu batas butir dengan butir, ferit dengan perlit, dan impurity dengan butir. Sel galvanik terjadi bila struktur mikrokopis paduan fase pada logam berada dalam lingkungan elektrolit. Misalnya ferit akan bersifat anode sedang karbide akan bersifat anode.

Kandungan Karbon berpengaruh terhadap laju korosi, semakin tinggi kandungan karbon maka laju korosi akan naik. Elemen lain yang terkandung dalam baja juga berpengaruh terhadap kecepatan laju korosi, sehingga untuk mendapatkan baja yang lebih tahan terhadap korosi seringkali ditambah dengan Cromium dan Nikel.

Pada baja yang memiliki kekuatan berbeda, tentu mempunyai sifat ketahanan terhadap korosi dan perambatan retak yang berbeda. Dimana baja tersebut mempunyai tegangan luluh dan tegangan tarik yang tidak sama. Untuk itu pada penulisan ini akan dibahas lebih lanjut pengaruh air laut (korosi) terhadap kelelahan struktur, terhadap baja lunak dan baja kekuatan tinggi. Kondisi korosi didapatkan dengan melakukan penyemprotan air laut terhadap spesimen pada siklus-siklus tertentu.

Pengujian dilakukan dengan memakai suatu formula pendekatan, rumus Paris - Erdogan yaitu sebagai berikut :

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad [1.1]$$

dimana :

- $da/dN$  : Pertambahan retak dibanding pertambahan siklus pembebanan
- $C$  dan  $m$  : Konstanta yang tergantung pada material
- $\Delta K$  : Stress Intensity Factor

## I.2. TUJUAN.

1. Mempelajari Stress Corrosion Cracking dan pengaruhnya terhadap laju perambatan retak.
2. Membandingkan laju perambatan retak pada baja lunak dan baja kekuatan tinggi karena pengaruh air laut.

## I.3. BATASAN MASALAH.

1. Benda uji yang dipakai untuk baja lunak dipakai SS 41 dan untuk baja kekuatan tinggi dipakai EMS 45.
2. Baja yang dipakai dianggap memenuhi kriteria kekuatan tarik untuk masing-masing tipe.
3. Benda uji dianggap sudah mempunyai cacat awal berupa takikan.

4. Beban yang dipakai adalah beban dinamis dengan amplitudo konstan.
5. Pembebanan tegak lurus terhadap penjalaran retak.
6. Tidak ada residual stress dalam material.
7. Dimensi struktur yang ditinjau relatif lebih besar dibandingkan retak yang ada.
8. Suhu dalam pengujian dipakai suhu ruangan.
9. Kondisi air laut yang dipakai adalah air laut dengan kondisi tertentu (satu kali pengambilan sample).

#### **I.4. METODOLOGI PENELITIAN.**

- Metode analisa literatur.

Metode analisa literatur digunakan dengan mendapatkan masukan dari paper - paper dari beberapa percobaan yang telah dilakukan untuk memperkuat dasar teori.

- Metode eksperimen.

Mengamati langsung di Laboratorium Konstruksi dengan memakai mesin uji statis dinamis, laju perambatan retak pada kondisi normal dan kondisi korosif (pengaruh air laut) pada baja lunak dan baja diperkuat. Hasil dari pengamatan tersebut dibandingkan untuk mengetahui fatigue korosi pada kedua material tersebut.

## BAB II

### BAJA KARBON

#### II.1. DIAGRAM FASE BESI - KARBON.

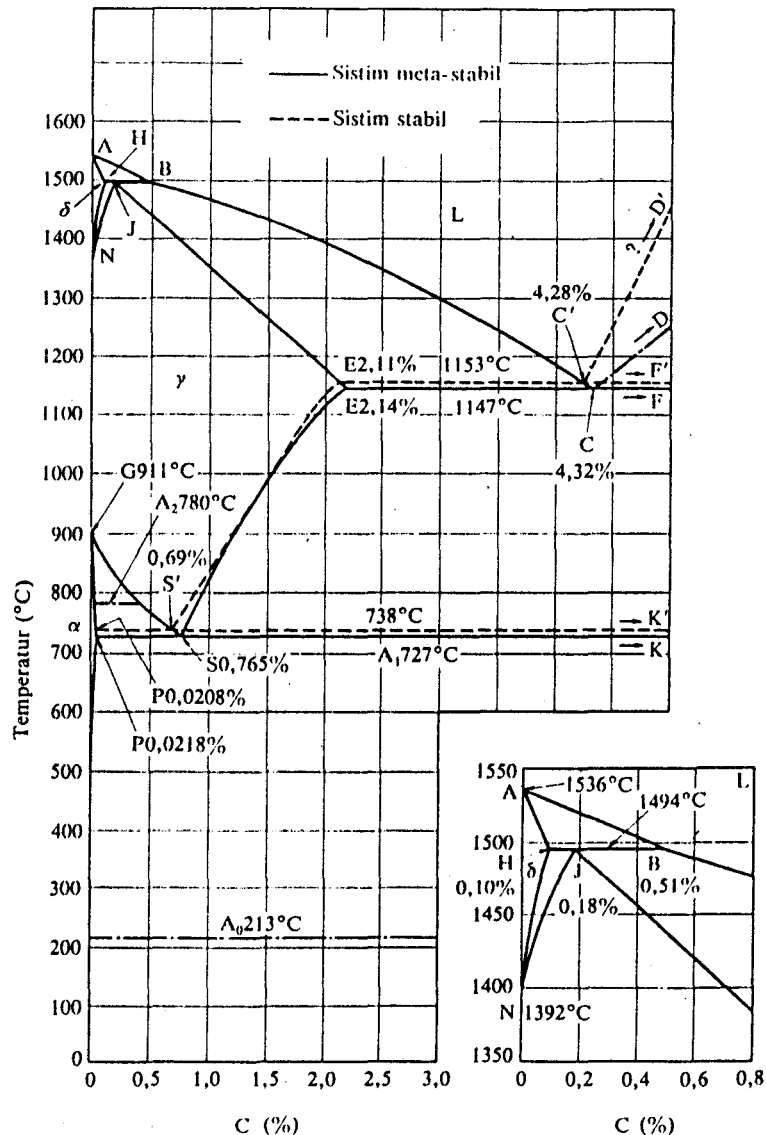
*Baja* adalah campuran antara besi dan karbon, yang mempunyai spesifikasi pemakaian dan bentuk yang bervariasi. Kemampuan baja sebagai material konstruksi terbukti dengan banyaknya jenis baja yang dibuat. Mulai dari baja sangat lunak sampai baja sangat keras, ketahanan korosi baja yang beragam, kemampuan sebagai transformator, dan sifat paramagnetik atau feromagnetik.

Baja selain mengandung karbon, juga mengandung unsur pengotor seperti sulfur dan fosfor yang berasal dari logam besi dan minyak yang dipakai untuk menguraikan logam. Seringkali pula ditambahkan unsur-unsur lain sebagai paduan yang dapat memberikan karakteristik terhadap baja seperti silikon, mangan, nikel, chromium, dan lainnya.

Dalam diagram fase besi dan karbon ini ditunjukkan keseimbangan besi-karbon sebagai bahan dasar dari baja. Unsur-unsur pengotor maupun paduan akan diabaikan dalam diagram ini.

Karbon dalam paduan ini dapat berupa karbon bebas, (grafit) atau senyawa interstitial (sementit,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) Grafit adalah karbon dalam bentuk yang paling stabil karena itu paduan yang mengandung karbon berupa grafit dinamakan sistem *paduan Fe-C stabil*. Sedang sementit adalah struktur

yang metastabil, sehingga paduan yang mengandung sementit dinamakan sistem paduan *Fe-C Metastabil*



Gambar 2.1. Diagram keseimbangan besi-karbon.

Dari diagram ini jumlah karbon yang dapat larut dalam besi, sedikit sekali dalam besi -  $\alpha$ , sekitar 2% dalam besi -  $\gamma$ . Paduan dengan kadar karbon dibawah 2% mempunyai sifat lebih ulet, dapat dibentuk dengan



proses pembentukan pada suhu stabil. Tidak bersifat feromagnetik pada setiap suhu. Karena semua karbon dapat larut di dalam besi - struktur mikronya terdiri dari ferrit.

Bila kandungan karbon lebih dari 2%, paduan akan terdiri dari sejumlah eutektik (terdiri dari lamel-lamel ferrit dan sementit) dan paduan ini bersifat getas, tidak ductile, relatif lunak dan tidak dapat menerima konsentrasi tegangan.

*Reaksi eutektoid* adalah proses penambahan larutan padat yang lebih rendah pada range suhu stabil dari phase larutan tersebut, dimana pendinginan dilakukan dengan cepat.

Eutektoid terjadi pada temperatur sekitar 1130°C dengan kadar karbon 0.43% dan temperatur 723°C dengan kadar karbon 0.8%. Pada kadar 0.8% karbon baja seluruh strukturnya perlit, yang terdiri dari ferrit dan sementit. Paduan dari ferrit yang lunak dan sementit yang keras, kuat dan getas akan meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja walaupun mengurangi keuletannya. Kenaikan kekuatan dengan naiknya kadar karbon hanya berlaku sampai komposisi eutektoid. [4]

Bila kadar karbon kurang dari kemampuan karbon akan larut dalam besi  $\alpha$ -1, maka karbon akan menjadi sementit dan merupakan bagian perlit (eutektoid). Baja ini disebut baja *hypoeutektoid*, yang terdiri dari struktur ferrit mendekati besi murni dan perlit.

Bila kadar karbon lebih dari komposisi eutektoid disebut baja *hipereutektoid*, yang terdiri fasa perlit dan sementit pada batas butir.

---

## II.2 KLASIFIKASI BAJA.

Baja Karbon diklasifikasikan dalam beberapa golongan berdasarkan kandungan karbon yang ada didalamnya, antara lain :[4]

- Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steel) mengandung 0.03 % - 0.30 % C.
- Baja Karbon Menengah (Medium Carbon Steel) mengandung 0.30% - 0.55% C.
- Baja Karbon Tinggi (High Carbon Steel) mengandung 0.55% keatas.

Pengkodean baja menurut AISI dan SAE adalah dengan empat digit angka, dimana dua digit pertama menunjukkan tipe dari elemen campuran dan dua digit terakhir menunjukkan kandungan karbon dalam material. Untuk baja karbon dipakai kode 10xx, yang menunjukkan material adalah plain carbon steel dengan kandungan carbon diwakili xx.

Kenaikan kandungan karbon dalam baja, walaupun hanya sedikit saja akan mempengaruhi pada sifat baja, antara lain :[13]

1. Titik leleh baja lebih tinggi dan tahan panas.
2. Baja menjadi lebih keras, kurang mudah dimesin.
3. Memiliki kekuatan tarik lebih tinggi dan kurang ductile.
4. Lebih sulit dilas tanpa retak.

---

### II.3. BAJA LUNAK.

Baja lunak (Mild Steel) adalah termasuk Baja Karbon Rendah, menurut AISI pengkodean untuk mild steel adalah 1105 - 1030. Dimana kandungan karbon dalam baja ini tidak lebih dari 0.3 %. Selain karbon baja ini hanya mengandung unsur tambahan Mangan dan Silikon masing-masing lebih besar dari 0,04%. Sifat mekanis dari baja karbon rendah ini adalah :

1. Kekuatan tarik sangat rendah berkisar 40.000 - 70.000 psi.
2. Keuletan tinggi sampai 25 - 40 %.
3. Kekerasan 110 - 150 Brinell.
4. Mudah dibentuk , mampu las yang baik namun tidak sepenuhnya dapat diperlakukan panas.

Baja lunak ini sangat luas penggunaannya, sebagai baja konstruksi, rangka bangunan, rangka kendaraan, baut, mur, pelat untuk kapal, dan lain-lain.

### II.4. BAJA KEKUATAN TINGGI

Baja diperkuat atau baja kekuatan tinggi adalah baja yang mempunyai kekuatan lebih tinggi dari baja lunak, dengan kekuatan tarik berkisar 50 - 100 kg/mm<sup>2</sup>. Baja kekuatan tinggi merupakan baja karbon rendah yang mendapat perlakuan tertentu yang dapat meningkatkan kekuatan baja.

Penguatan baja dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain :

- Dengan penambahan kandungan karbon .

Penambahan unsur karbon dalam baja akan meningkatkan kekuatan tarik dari baja, menaikkan titik leleh. Penguatan baja ini harus diimbangi dengan penambahan unsur Mn dan Si yang dapat memperbaiki kekerasan baja akibat penambahan karbon. Penguatan ini menghasilkan baja karbon menengah atau baja karbon tinggi.

- Penambahan unsur paduan.

Penambahan unsur lain dalam baja akan memperbaiki sifat-sifat baja. Dengan penambahan unsur paduan akan didapat salah satu sifat baja yang diharapkan.

Penguatan baja dengan cara paduan banyak dilakukan dengan penambahan unsur Nikel, Chrom, Mangan, dan lainnya yang dapat meningkatkan kekuatan tarik baja dengan beberapa sifat lainnya.[14

Dalam tulisan ini dipakai baja dengan jenis Baja Karbon Menengah (Medium Carbon Steel), yang memiliki kekuatan tarik lebih tinggi dibanding baja lunak. Baja jenis ini adalah bahan yang dapat dikurangi berat, luas penampang, ketebalannya sehingga konstruksi menjadi ringan. Baja kekuatan tinggi digolongkan baja berkekuatan tarik tinggi.

Baja diperkuat penggunaannya hampir sama dengan baja lunak, tapi dipakai untuk struktur atau komponen yang membutuhkan kekuatan dan ketangguhan yang cukup.

Dalam proses pembuatan baja kekuatan tinggi digolongkan menjadi :

- Baja kekuatan tinggi tanpa perlakuan panas.
- Baja kekuatan tinggi dengan perlakuan panas.

#### **II.4.1. Baja Kekuatan Tinggi Tanpa Perlakuan Panas.**

Baja kekuatan tinggi dipakai dalam keadaan setelah dirol atau dinormalkan dengan struktur mikro ferit dan perlit. Penguatan ini dengan menambahkan unsur paduan terutama Si dan Mn dan dengan penghalusan butir. Penambahan unsur C akan meningkatkan kekuatan baja dan menurunkan kemampuan las karena baja menjadi getas.

Diameter struktur mikro perlit dan ferit berpengaruh terhadap kekuatan tarik, dimana jumlah perlit tergantung pada kadar C, yang akan meningkatkan kekuatan tarik dan tidak mempengaruhi titik mulur. Diameter ferit berpengaruh terhadap titik mulur, dengan metode pengerolan terkendali akan diperoleh diameter butir yang dikehendaki.

#### **II.4.2. Baja Kekuatan Tinggi dengan Perlakuan Panas.**

Agar kekuatan baja meningkat dan keuletannya pada temperatur rendah juga meningkat, baja perlu mendapat perlakuan panas. Perlakuan panas terdiri berbagai tahapan, pemanasan sampai temperatur tertentu, penahanan beberapa saat, dan pendinginan dengan kecepatan tertentu. Selama proses tersebut terjadi perubahan struktur mikro yang dapat menyebabkan perubahan sifat dari logam tersebut. Struktur mikro ini selain

ditentukan oleh komposisi kimia dan laku panas yang dialami struktur atau kondisi awal benda.

#### **A. Hardening.**

Adalah pemanasan baja sampai austenit kemudian temperatur ditahan beberapa saat dan didinginkan dengan cepat, adapun faktor-faktor yang mempengaruhi adalah : kadar Karbon, temperatur pemanasan, waktu penahanan dan laju pendinginan.

#### **B. Waktu Penahanan ( Holding Time ).**

Adalah untuk membuat austenit lebih homogen, sehingga atom-atom dapat berdifusi secara sempurna. Lama waktu penahanan tergantung pada tingkat kelarutan karbida, ukuran butir yang diinginkan, jenis baja, temperatur austenitisasi yang dipakai dan laju pemanasan.

Dengan quenching diperoleh bahwa kekerasan maksimal dapat dicapai dengan pemanasan sampai kesuatu daerah temperatur yang sempit. Bila pemanasan lebih tinggi lagi, kekerasan akan turun karena terlalu banyak karbida yang larut sehingga austenite sisa akan cukup banyak.

#### **C. Laju Pendinginan.**

Pendinginan dipakai untuk mencapai struktur martensit, media pendingin yang biasa dipakai antara lain air, minyak, campuran minyak dan air, udara atau garam cair. Pendinginan dengan air mempunyai laju yang

cukup tinggi sehingga akan menimbulkan tegangan akibat transformasi dan selisih temperatur yang dapat menimbulkan retak. Minyak mempunyai kapasitas pendinginan tertinggi pada temperatur sekitar 600° C dan agak rendah pada daerah temperatur pembentukan martensit.

## **BAB III**

### **KELELAHAN PADA MATERIAL**

#### **III.1. MEKANISME KELELAHAN DAN PERAMBATAN.**

Suatu stuktur dan komponen pada kenyataan menerima tegangan yang seringkali berubah baik besar maupun arahnya. Kondisi yang demikian akan menimbulkan kerusakan padaa struktur yang disebut dengan kegagalan lelah (fatigue failure).

Kegagalan menurut J.F.Knot terbagi menjadi : [8]

1. Kegagalan karena buckling.
2. Kegagalan karena jamming.
3. Kegagalan karena yielding.
4. Kegagalan karena necking.
5. Kegagalan karena cracking.

Dalam tulisan ini akan dibahas kegagalan karena cracking yang disebabkan kelelahan akibat adanya low stress. Retak yang dibahas disini adalah retak stabil yang penjarannya dapat terdeteksi.



---

Menurut D. Broek kegagalan karena retak dapat digolongkan menjadi 3 macam : [2]

1. Fatigue cracking.
2. Hydrogen cracking.
3. Stress Corrosion cracking.

Adanya suatu cacat pada komponen logam akan menimbulkan kegagalan karena terjadinya pemusatan tegangan, dimana tegangan tidak dapat didistribusikan secara merata pada semua ikatan dalam struktur kristal dengan sempurna.

Pada plat yang memiliki cacat awal (notch) gaya luar yang dikenakan padanya akan mengalami perubahan arah distribusi yang menyebabkan meningkatnya tegangan lokal.

Proses manufacturing, mekanisme mekanik atau mekanisme korosif merupakan tahap terbentuknya cacat awal (initiation) yang kemudian dapat menjalar akibat mekanisme mekanis atau mekanisme korosif.

Pembentukan retak dibawah pembebanan, dipengaruhi oleh bentuk pembebanan, antara lain :[11]

1. **Mode I (Opening In Tension).**

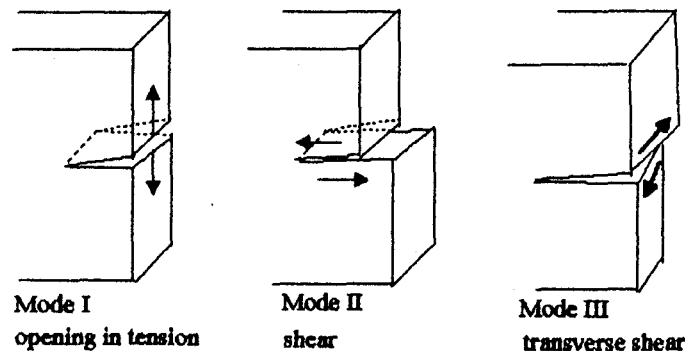
Crack Opening Mode, retak dibuka lebar pada permukaan retakan akibat adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap bidang penjarangan retak.

## 2. Mode II (Forward Shear).

In Plane Mode, bagian retak searah dengan bidang penjalaran retak, yang diakibatkan oleh tegangan geser.

## 3. Mode III (Tranverse Shear).

Anti Plane Shearing Mode, perambatan retak seperti robekan karena permukaan retakan bergeser terhadap lainnya dalam arah sejajar tepi takikan. Retak yang diakibatkan tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak.



Gambar 3.1. Tahapan (Mode) dari proses kelelahan.

Karena retak fatigue memiliki tendensi kuat pada pertumbuhan tegak lurus terhadap tegangan tarik maka Mode I paling berpengaruh terhadap kekuatan struktur.[2]

### **III.2. PROSES KELELAHAN.**

Perlu diketahui proses-proses yang terjadi di dalam struktur material selama usia kelelahan (fatigue-life), dan untuk menentukan umur kelelahan tersebut kita tinjau dalam 5 fase antara lain :[11]

1. Penggelinciran Berulang (Cyclic Slip).
2. Retak Inti (Crack Nucleation).
3. Pertumbuhan Retak Mikro (Microcrack Growth).
4. Pertumbuhan Retak Makro (Macrocrack Growth).
5. Kegagalan Akhir(Final Failure).

#### **III.2.1. Penggelinciran Berulang (Cyclic Slip).**

Pada pembebanan berulang yang relatif rendah dibanding pembebanan statis, penggelinciran berulang akan terjadi dalam sejumlah kecil butiran dari polycrystalline material (garis kristal majemuk / ganda).

Butiran ini merupakan fenomena lokal, karena hanya pada beberapa pita saja tegangan geser berulang cukup tinggi untuk menghasilkan slip / gelinciran. Gelinciran berulang inilah yang dapat menyebabkan terjadinya fatigue atau kelelahan.

#### **III.2.2. Retak Inti (Crack Nucleation).**

Setelah sejumlah beban berulang retak mikro dapat ditemukan dalam pita-pita penggelinciran. Suatu penelitian mikroskopik menyatakan

---

bahwa retak inti terjadi pada awal usia kelelahan, kemungkinannya adalah beberapa persen dari usia kelelahan.

Dua aspek penting yang dapat menerangkan masalah retak inti antara lain :

- Butiran pada permukaan material tidak selalu dikelilingi oleh butiran lain. Pada sisi luar adalah lingkungan yang tidak solid (tidak padat). Pada sisi ini akan menyebabkan rendahnya penahan micraplasticitas. Pada permukaan bebas slip lebih mudah terjadi, dengan jarak penggelinciran jauh lebih besar karena tidak ada penahan butiran-butiran di dekatnya.
- Butiran-butiran permukaan selalu berhubungan dengan lingkungan. Bahkan untuk udara normal pun keberadaan oksigen dan uap air dapat menyatu dengan penggelinciran berulang untuk menghasilkan retak inti.

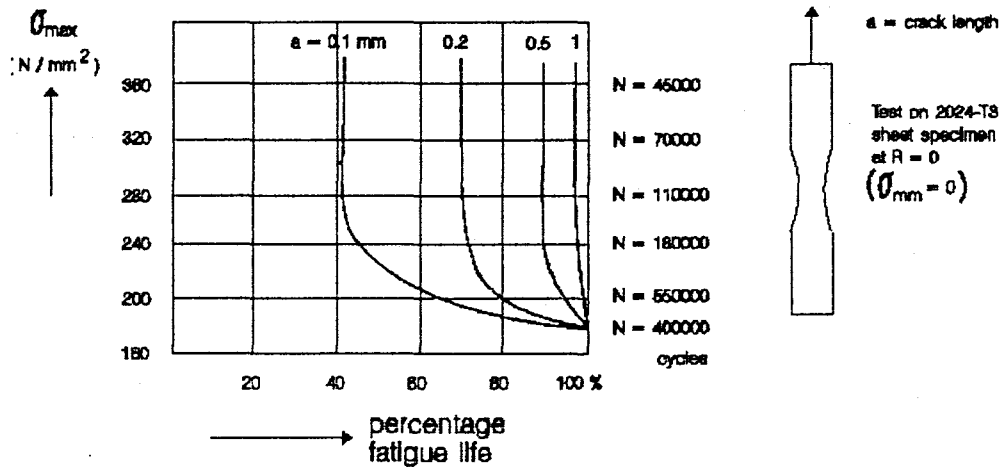
Contoh yang penting untuk retak inti di permukaan bebas seperti pemasukan (inclusion) pada inti. Ini dapat terjadi pada low alloy high strength steel pada inclusion yang kecil. Akibat berbagai campuran tersebut mengakibatkan kecenderungan butiran dan susunan kristal yang terjadi akibat pemasukan pada daerah permukaan akan mengalami retak inti. Hal ini mungkin merupakan hasil dari argumen pertama dimana terdapat hambatan yang lebih rendah di dekat permukaan bebas.

---

### III.2.3. Pertumbuhan Retak Mikro (Mikrocrack Growth).

Dalam satu retak mikro, menggambarkan konsentrasi tegangan pada ujung retak (crack- tip) yang akan terjadi. Penggelinciran berulang akan terkonsentrasi pada ujung retak menuju ke penjalaran retak selanjutnya. Seperti ditunjukkan pada studi mikroskopis pertumbuhan retak mikro dapat meliputi bagian yang relatif besar dari usia kelelahan. Dengan kata lain pada beberapa saat awal usia kelelahan, retak dapat dilihat dengan mata telanjang dan kemudian disebut retak makro. Hal ini dapat dilihat pada gambar yang menunjukkan setelah 1 mm retak dapat dilihat hanya dalam prosentase yang kecil dari usia kelelahan sampai terjadi kegagalan. Hasil yang maksimal dapat terlihat pada spesimen tanpa takik, dimana pada spesimen dengan takik retak makro dapat terjadi pada kondisi awal.

Pernyataan lain menyebutkan bahwa pertumbuhan retak mikro pada atau di dekat permukaan meliputi bagian yang besar dari usia kelelahan. Berarti bahwa kondisi lokal pada permukaan material dan kualitas permukaan material sangat berarti bagi umur kelelahan yang sebagian besar ada ada fase retak makro.



Gambar 3.2. Retak kecil yang digambarkan lebih awal dari usianya kecuali pada tingkatan low stress.[7]

#### III.2.4. Pertumbuhan Retak Makro (Macrocrack Growth).

Perpindahan dari retak mikro ke makro tidak dapat didefinisikan secara kuantitatif. Secara nominal retak makro adalah retak yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Sebagai tambahan dinyatakan pertumbuhan retak tidak lagi tergantung pada permukaan lokal dan kondisi material yang berperan dalam retak inti dan pertumbuhan retak mikro, namun retak makro dapat mewakili nilai dari pertumbuhan retak itu sendiri.

Pertumbuhan retak yang ada menyarankan transisi dari mikro ke makro sekitar 1 mm, namun tidak ada ketentuan bahwa harga tersebut harus diambil. Pada beberapa kasus, fatigue crack nucleation muncul pada

permukaan yang berkualitas tinggi dan retak tersebut akan muncul sebagai retak makro yang relatif awal dari usia yang diperkirakan. Juga apabila perambatan retak diawali dari cacat makro, maka hal itu adalah retak makro dari permulaan. Pada kasus lain, kerusakan permukaan telah menyebabkan perambatan retak makro pada awal umur pelayanan (service life).

### **III.2.5. Kegagalan Akhir (Final Failure).**

Pada saat retak makro menjalar lebih besar, penampang melintang struktur yang tidak mengalami retak menjadi lebih kecil. Akhirnya karena penampang terlalu kecil untuk menerima beban berulang maksimum, maka kegagalan terjadi sebagai siklus akhir dari usia kelelahan.

Kegagalan akhir biasanya menunjukkan makroplastisitas tertentu seperti kegagalan karena beban statis.

## **III.3. PERAMBATAN RETAK.**

Dalam perambatan retak yang terjadi dalam struktur, ada beberapa faktor yang berpengaruh didalamnya.

### **III.3.1. Faktor Intensitas Tegangan.**

*Faktor Intensitas Tegangan* (Stress Intensity Factor) adalah parameter yang menggambarkan keadaan dari ujung retak, yang dilambangkan dengan huruf K dengan subscript mode pembebanannya. Besar K ini tergantung pada pembebanan, konfigurasi bentuk (geometri), ketajaman retak dan mode pertambahan retak.

Faktor Intensitas Tegangan untuk plat tak terhingga dituliskan dengan persamaan :[6]

$$\sigma_{ij} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad [3.1]$$

dimana :  $KI$  =  $\sigma \sqrt{\pi a}$   
 $\sigma$  = tegangan  
 $a$  = panjang retak

Nilai K untuk bermacam pembebanan dan konfigurasi dapat dihitung dengan memakai teori elastisitas, termasuk diantaranya secara perhitungan analitis dan numerik dengan metode penelitian. Stress Intensity Factor untuk bentuk geometri retak, pembebanan, dan konfigurasi umumnya memakai modifikasi dari persamaan diatas, seperti :

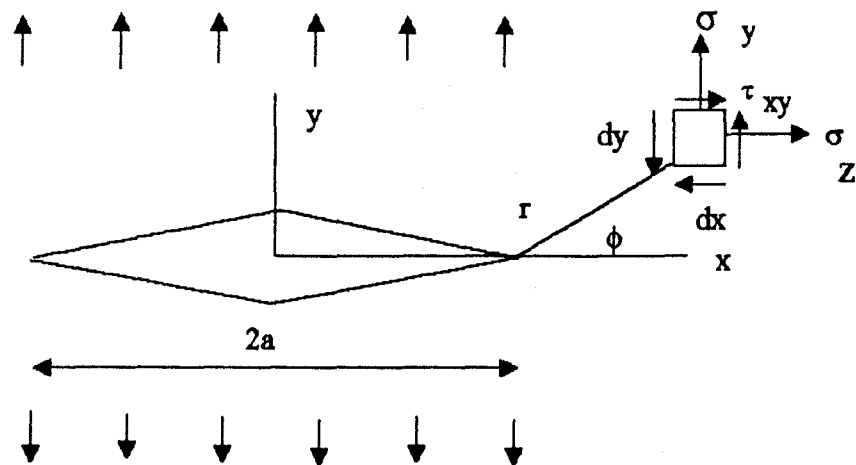
$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \text{ atau } K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad [3.2]$$

dimana  $a$ ,  $f(a/W)$  adalah parameter tanpa dimensi yang menunjukkan persamaan yang sedikit lebih kompleks.

Persamaan K di atas hanya berlaku untuk keadaan dimana ukuran daerah plastis di ujung retak lebih kecil dibanding panjang retak. Sehingga



Stress Intensity Factor dapat dipakai untuk menghitung kecepatan perambatan retak, dan apabila terdapat dua retak dengan faktor intensitas tegangan yang sama maka akan mempunyai kecepatan perambatan yang sama.



Gambar 3.3 Retak untuk pelat tak terbatas.

### III.3.2. Fracture Toughness (K<sub>IC</sub>).

*Fracture Toughness* adalah suatu notasi yang menunjukkan ukuran untuk hambatan pertumbuhan retak. Fracture toughness disebut juga ketegaran perpatahan material yang tergantung pada jenis material, temperatur, strain rate, lingkungan, ketebalan, dan panjang retak. Apabila suatu bahan mampu bertahan terhadap retak dan mungkin menghambat pertumbuhan retak, maka bahan tersebut memiliki sifat rekayasa yang

dinginkan. Dilain pihak untuk bahan yang kekuatannya ditingkatkan umumnya mengalami kerapuhan yang berakibat turunnya kemampuan bahan untuk menghambat pertumbuhan retak, sehingga bila dikenai tegangan lebih besar, retak akan menjalar lebih cepat sehingga kegagalan lebih cepat terjadi.[11]

Ketegaran perpatahan merupakan nilai kritis dari  $K$  untuk kondisi retak yang terjadi tanpa adanya kenaikan beban atau energi yang diberikan. Fracture Toughness dituliskan dengan persamaan :

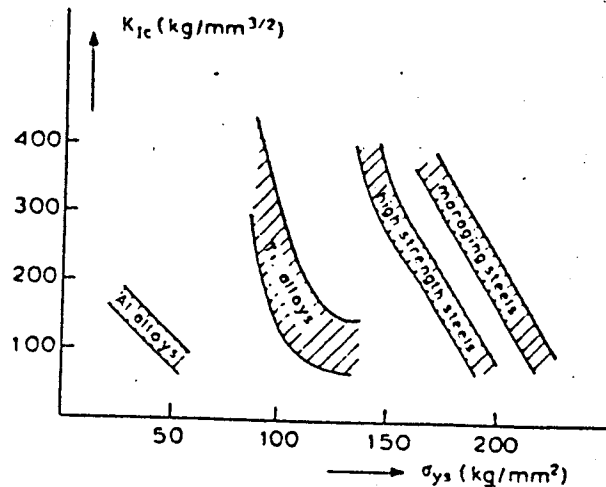
$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} f\left(\frac{a_c}{w}\right) \quad [3.3]$$

dimana :

$\sigma_c$  = tegangan nominal yang dikenakan pada retak pada kondisi tak tentu.

$a_c$  = panjang retak pada kondisi tak tentu.

Tegangan luluh mempunyai pengaruh terhadap ketegaran perpatahan karena material yang memiliki tegangan luluh lebih tinggi umumnya memperlihatkan sifat ductility yang rendah. Dapat diasumsikan bahwa pada proses kenaikan tegangan luluh tidak berakibat terhadap kandungan partikel dalam material. Karena tegangan luluh yang tinggi, maka hanya dibutuhkan regangan plastik yang lebih kecil untuk mendapatkan tegangan pada partikel yang dipakai untuk mengawali kekosongan. Konsekuensinya kepecahan dapat timbul pada regangan yang lebih rendah [10]. Hubungan tegangan luluh dengan fracture toughness dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Fracture toughness sebagai fungsi yield stress

### III.3.3. Laju Perambatan Retak Menengah.

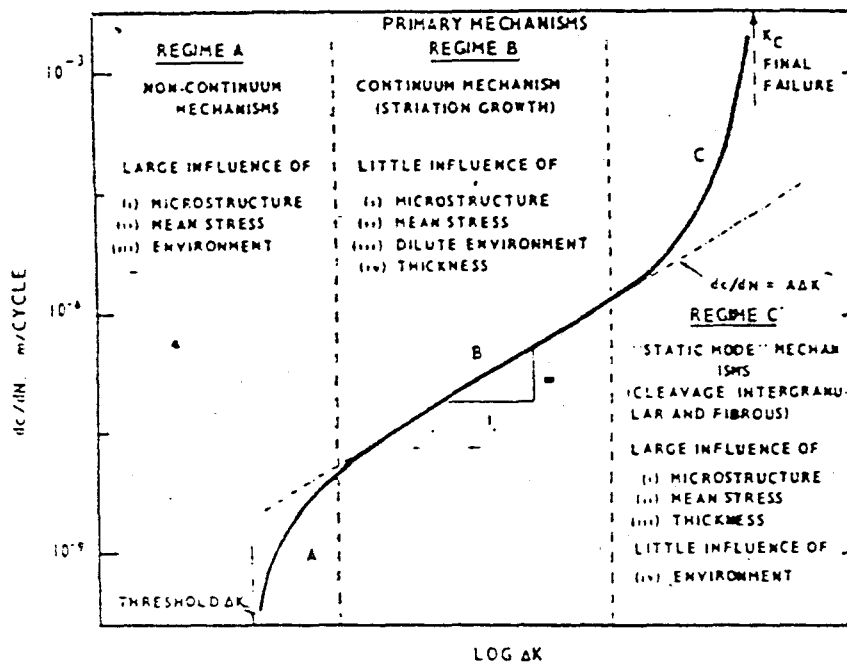
Formula untuk menghitung laju pertambahan retak diusulkan oleh Paris-Erdogan dengan menghubungkan  $da/dN$  dengan rentang faktor intensitas tegangan oleh persamaan :[2]

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad [3.4]$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

Sejumlah data perambatan retak fatigue baik untuk material ferrous atau non ferrous telah didapat dengan pendekatann Paris-Erdogan. Dari pendekatan faktor intensitas tegangan dapat memberikan analisa dari data percobaan yang dapat diaplikasikan terhadap beberapa masalah teknik.

Dari penyelidikan lebih lanjut menunjukkan berdasar pada grafik log perambatan retak fatigue  $da/dN$  dengan rentang faktor intensitas tegangan, formula Paris-Erdogan hanya valid pada daerah menengah pada kecepatan perambatan retak yaitu antara  $10^{-8}$  -  $10^{-6}$  m/siklus atau  $10^{-5}$  -  $10^{-3}$  m/siklus, yaitu terletak pada daerah B dari diagram dibawah :



Gambar 3.5. Diagram variasi sigmoidal laju perambatan retak  $da/dN$  dengan SIF.

Variasi dari laju perambatan retak  $da/dN$  dengan  $\Delta K$  adalah berbentuk sigmoidal, dimana harga  $\Delta K$  dibatasi oleh  $K_c$  dan threshold parameter. Pada harga  $\Delta K$  yang tinggi Paris- Erdogan menunjukkan gejala estimasi (daerah C), sedang untuk nilai  $\Delta K$  rendah formula ini menjadi terlalu berlebihan (daerah A).

Jadi dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa formula Paris-Erdogan memberikan gambaran yang bagus pada daerah laju perambatan retak menengah, sehingga dari data yang ada dapat diketahui jumlah siklus yang dibutuhkan untuk merambatnya retak awal sampai dengan ukuran kritis yang dapat menimbulkan kegagalan.

Bila besar regangan geser sebanding dengan bukaan retak (crack opening displacement), pertambahan perambatan retak untuk tiap siklus dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{da}{dN} = \beta \Delta(CTOD) = \beta \frac{\Delta K^2}{E \sigma_{cy}} \quad [3.5]$$

dimana :  $E$  = Modulus Young

$\sigma_{cy}$  = Tegangan yang bekerja

$\beta$  = Effisiensi proses penumpulan

CTOD = Bukaan ujung retak

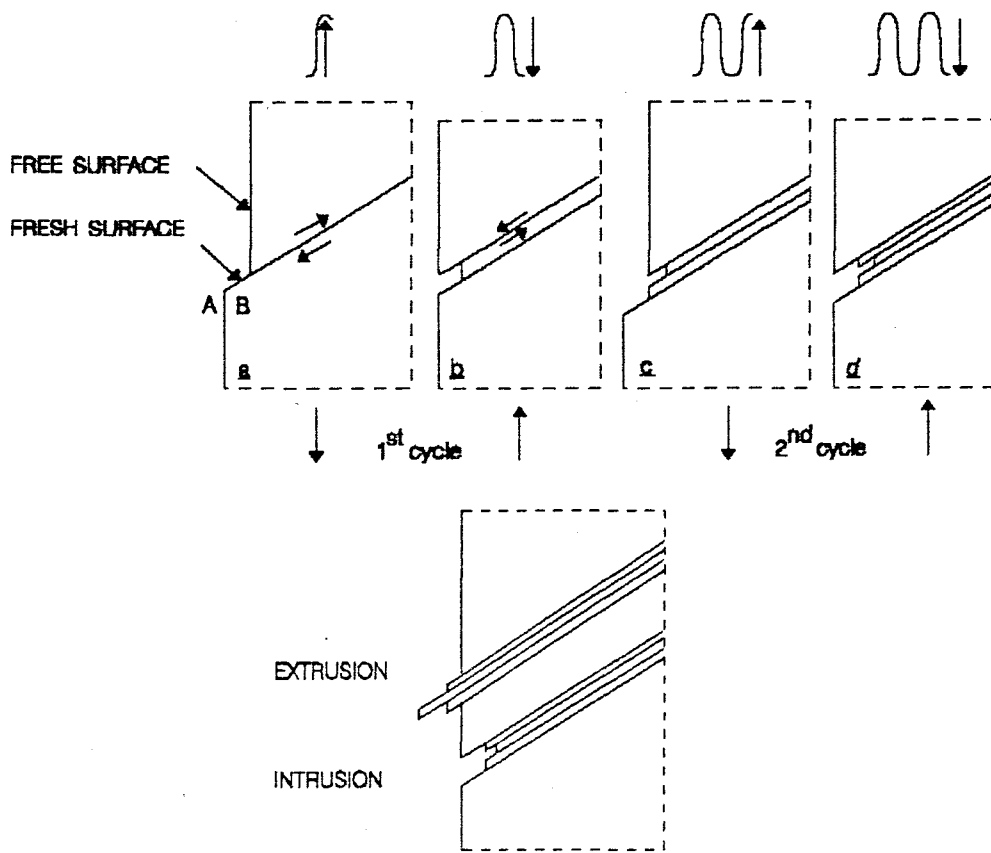
Untuk model Laird Smith dan model penumpulan plastis yang berdasar pada teori COD, menghasilkan persamaan Paris dengan koefisien  $m = 2$  (second power Paris equation). Harga  $m = 2$  didapat apabila kepecahan struktur diakibatkan oleh proses kepecahan mikro yang terjadi pada daerah dekat ujung retak yang panjangnya sebanding dengan CTOD dan merupakan model penumpulan ujung plastis.

Teori perambatan retak yang berdasarkan pada kerusakan kumulatif pada daerah plastis di depan ujung retak, menghasilkan koefisien  $m = 4$ . Harga ini didapat bila kepecahan disebabkan oleh suatu proses secara mikro.

#### **III.4. MEKANISME KELELAHAN.**

Mekanisme kelelahan diterangkan oleh Wood (1958) [11] secara sederhana yang dapat menerangkan retak inti pada retak mikro yang pertama. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.6. Pembebanan ke arah atas pertama slip akan menghasilkan tahap permukaan, diikuti dengan pembebanan ke bawah akan menyebabkan penggelinciran pada arah yang berlawanan, tidak tepat pada bidang penggelinciran yang sama. Ada dua alasan mengapa tegangan geser pada daerah ini mengalami kenaikan. Pada level mikro terdapat konsentrasi tegangan geser dalam butiran pada bidang geser yang paralel. Ini ditunjukkan selama pembebanan ke atas yang pertama.

Mikroplastisitas dari pembebanan ke atas akan menimbulkan tegangan sisa mikro (mikro residual stresses) yang akan membantu untuk menyebabkan plastisitas terbalik (reserved plasticity) yang disebut efek Bauschinger lokal pada tingkat mikro. Kita masih harus menjelaskan mengapa penggelinciran terbalik tidak muncul pada bidang penggelinciran yang sama.



Gambar 3.6. Model Wood untuk inisiasi retak mikro pada pita penggelinciran.

Bila hal itu terjadi, situasi tanpa kerusakan akan diperbaiki yang menyebabkan retak tidak terdeteksi. Dua alasan yang dapat disebutkan :

1. Pembalikan keadaan plastis melibatkan suatu pergerakan perpindahan dari sudut strain-hardening, ini adalah suatu keadaan yang tidak diharapkan, atau dapat dikatakan suatu bidang yang telah mengalami slip sekali tidak dapat lagi mengalami slip kembali pada arah yang berlawanan sehubungan dengan strain-hardening.

2. Berhubungan dengan lingkungan, dimana penggelinciran pada tahap pertama menunjukkan material yang masih baru berhubungan dengan lingkungan. Dan semua material teknis beroksidasi sangat cepat sekali dan lapisan-lapisan oksidasi menempel kuat pada base metal. Plastisitas terbalik menghendaki adanya lapisan tersebut dihilangkan, tetapi itu tidak terjadi dengan adanya pegeseran terbalik. Dalam keadaan vakum alasan ini tidak dapat dipakai, meski pada keadaan itu fatigue masih mungkin terjadi. Gambar 3.6c dan d menunjukkan pengulangan apa yang terjadi pada siklus pertama. Retak mikro terbentuk sebagai suatu gangguan pada material.

Dari permodelan ini menerangkan beberapa hal :

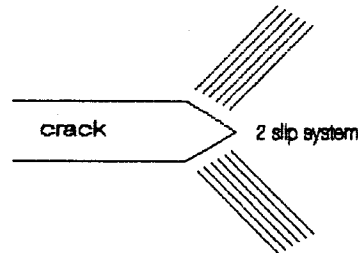
1. Retak inti dapat terjadi pada siklus pertama.
2. Perpanjangan dapat terjadi pada setiap siklus beban.
3. Bagian pertama dari perambatan retak mikro diharapkan terjadi sepanjang pita-pita penggelinciran.

#### **III.4.1. Pertumbuhan Retak dan Striation.**

Pada tahap awal dari pertumbuhan retak, hambatan yang lebih rendah pada penggelinciran sebagai akibat adanya permukaan bebas di sekitarnya yang akan meningkatkan retak pada pita penggelinciran untuk selang waktu tertentu. Setelah itu penetrasi kedalam material dengan hambatan lebih

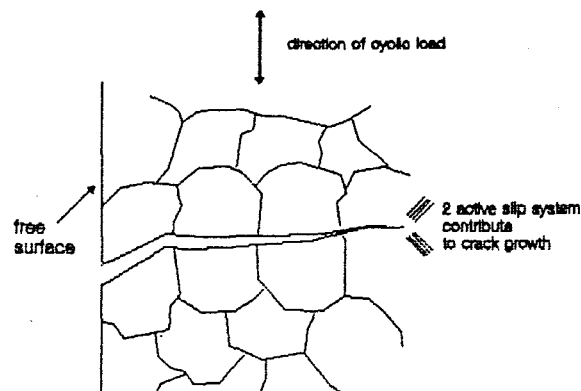


rendah akan hilang, selebihnya intensitas tegangan akan naik pada ujung retak. Sebagai hasilnya diharapkan penggelinciran terjadi lebih dari atau bidang orientasi penggelinciran. Dan ini dapat dilihat pada gambar 3.7.



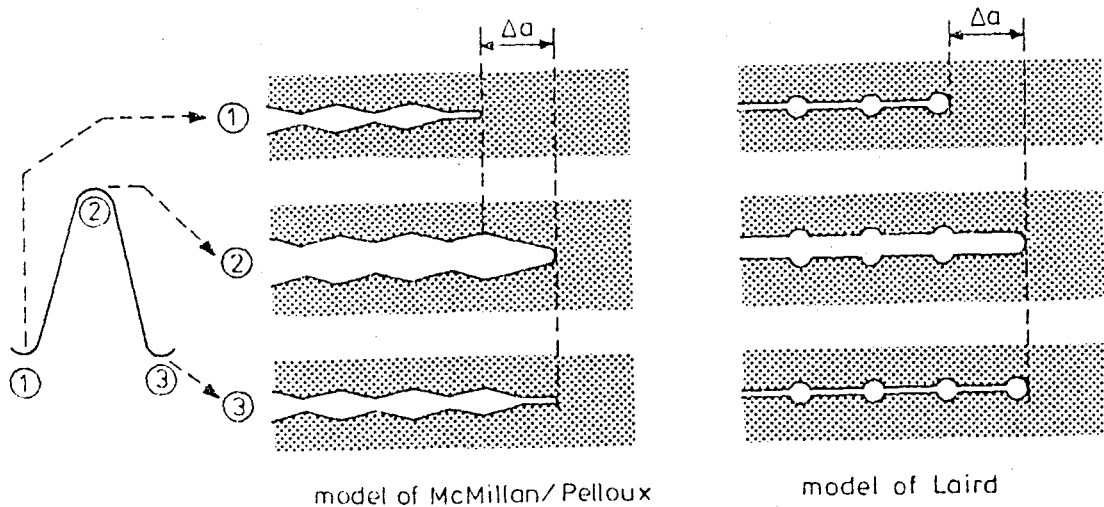
Gambar 3.7 Dua sistem kontribusi penggelinciran menuju bukaan retak pada cara yang sama menurut Wood.

Bahkan bila dua sistem penggelinciran yang berbeda aktif pada ujung retak, perpanjangan retak oleh langkah penggelinciran adalah mungkin. Dan retak akan bertambah kearah orientasi dari kedua sistem tersebut, dan disebut pertumbuhan retak tahap II, lihat gambar 3.8. Retak bagian depan yang menerus (continous crack front) adalah sebuah garis yang melewati sejumlah butiran yang berdekatan, dan selalu menuruti aturan tertentu dari arah perambatan pada butiran yang berdekatan sepanjang ujung retak.



Gambar 3.8. Tahap pertumbuhan retak pada permukaan bebas dan penetrasi ke dalam material

Retak fatigue dapat merambat oleh suatu mekanisme penggelinciran balik. Beberapa tahap dari pertumbuhan retak fatigue ditunjukkan pada gambar 3.9. Retak tajam dalam bidang tarik menyebabkan konsentrasi tegangan lebih besar pada ujung retak dimana penggelinciran lebih mudah terjadi. Pada material ini, retak (tahap I dan II) akan tergelincir sepanjang bidang slip pada arah tegangan geser maksimumnya. Sehingga retak akan terbuka sekaligus panjangnya bertambah, dan penggelinciran akan terjadi pada pada bidang lain (tahap II). Hardening dan peningkatan tegangan akan mengaktifkan bidang slip sejajar lainnya, yang menyebabkan penumpukan ujung (tahap II). Siklus membuka dan menutupnya retak (tahap I - III) akan membentuk suatu pola yang dikenal dengan striation.



Gambar 3.9 Dua model untuk mikroplastisitas dan striation.

Dua model yang berbeda pada gambar 3.9 menunjukkan bagaimana perambatan retak, yang melibatkan proses penumpukan dan penajaman ulang ujung retak. Selama pembebanan, retak tersebut akan diperluas sehingga ujung retak menjadi tumpul. Selama tidak ada pembebanan selanjutnya, ujung retak akan dipertajam kembali dan lebih kurang simetri / dilipat dua satu sama lain. Kedua model pada level mikro meninggalkan tepi-tepi deformasi plastis pada permukaan kepecahan yang dikenal dengan striation, yang berhubungan dengan satu putaran.

---

### III.4.2. Karakteristik Dari Kelelahan - Kepecahan

Alasan mengetahui karakteristik kepecahan - kelelahan adalah :

1. Untuk penafsiran hasil tes yang diperoleh dari percobaan, informasi yang dapat mendukung sering diperoleh dari penelitian tentang permukaan kepecahan.
2. Untuk kegagalan yang terjadi selama masa operasi, analisa grafik kepecahan (fracto-grafik) adalah kunci utama untuk menemukan penyebab kegagalan.

Hal pertama yang dilakukan adalah membedakan karakteristik makro dan mikro. Karakteristik makro akan dijelaskan terlebih dahulu karena dalam analisa kepecahan pengamatan terhadap permukaan kepecahan dimulai dengan mata telanjang dan dengan kaca pembesar.

#### A. Karakteristik Makro.

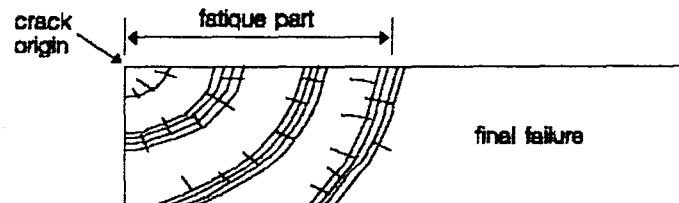
1. Tidak ada makro plastisitas dan permukaan datar.

Secara umum permukaan kepecahan menunjukkan bagian yang berbeda :

Jika kegagalan kelelahan yang nyata disebabkan pertumbuhan retak kelelahan pada gambar 3.10. Bagian ini disebabkan oleh kegagalan akhir.

Hal ini adalah karakteristik bagian kelelahan tanpa adanya deformasi plastis praktis. Bagian kelelahan biasanya

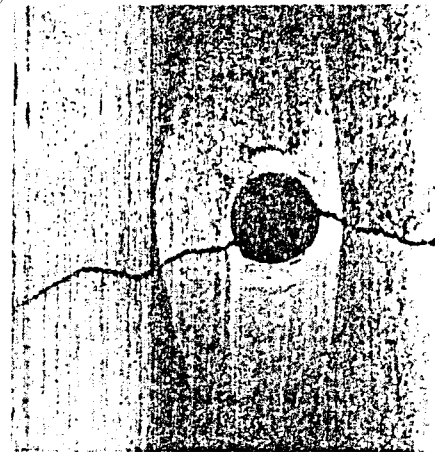
sangat datar, dimana kedua sisi komponen yang cacat dapat disambung kembali, jika bagian akhir kegagalan tidak ada yang menghalangi. Pada gambar 3.11 diilustrasikan perbedaan kegagalan kelelahan dengan kegagalan statis.



Gambar 3.10 Dua bagia kegagalan dan kelelahan



Kegagalan statis



Kegagalan akhir

Gambar 3.11 Perbedaan antara kegagalan statis dan kegagalan akhir

Dalam hal ini tidak ada makroplastisitas karena pertumbuhan retak kelelahan adalah hasil mikroplastisitas.

Lebih jauh lagi, hal tersebut memiliki siklus alami dengan kecenderungan membalikkan deformasi.

Konsekuensi dari tanpa adanya makroplastisitas adalah secara umum retak kegagalan sulit ditemukan. Observasi visual dalam inspeksi perawatan untuk retak kegagalan sulit dilakukan. Hanya bila diketahui dimana letak retak dan melihat hal yang sama sebelumnya.

## **2. Pita-pita Perambatan Konsentris (Concentric growth bands).**

Pada gambar 3.14c dan ditunjukkan pita-pita perambatan. Pita-pita tersebut juga ditunjukkan dengan adanya tanda-tanda tide, beach, clam-shell atau oyster-shell. Pita-pita tersebut mengindikasikan bagaimana retak menjalar. Perbedaan warna dihubungkan dengan berbagai variasi besarnya beban berulang. Derajat perbedaan dari korosi juga menimbulkan pita-pita, khususnya jika retak tidak ada perbedaan selama periode-periode tertentu.

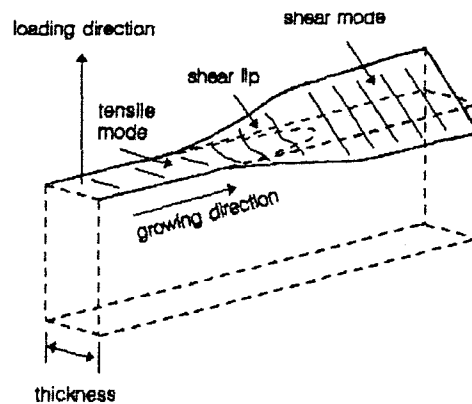
---

### 3. Arah perambatan tegak lurus tegangan utama.

Dari pengalaman menunjukkan bahwa retak kelelahan menjalar dengan arah tegak lurus tegangan utama, untuk kecepatan perambatan yang tidak terlalu tinggi. Untuk beban tarik berulang arah perambatan akan tegak lurus arah pembebanan. Untuk beban torsi berulang arah perambatan akan membentuk sudut  $45^\circ$  dengan arah pembebanan yang menyebabkan perambatan retak spiral (lihat gambar 3.13).

Jika retak kelelahan menjalar sangat cepat, sebagai contoh pada material yang tipis, sisi regangan dibentuk pada permukaan bebas dengan cara yang sama seperti retak statis lanjutan (crack extension statis). Lebar sisi regangan akan bertambah selama perambatan yang lebih cepat sampai menutupi tebal seluruhnya (gambar 3.12).

Arah pertumbuhan retak tetap tegak lurus arah perambatan. Transisi dari bentuk regangan Mode I ke bentuk tegangan I/III adalah karakteristik untuk pertumbuhan retak kelelahan yang cepat pada material tipis. Pada gambar 3.12 sisi-sisi gaya geser adalah sejajar yang akhirnya menuju ke bentuk geser tunggal. Bagaimanapun juga jika dua sisi regangan membentuk sudut yang berlawanan ( $+45^\circ$  dan  $-45^\circ$ ) yang menyebabkan kegagalan tegangan geser ganda.



Gambar 3. 12 Perpindahan Tensile Mode ke Shear Mode pada material plat

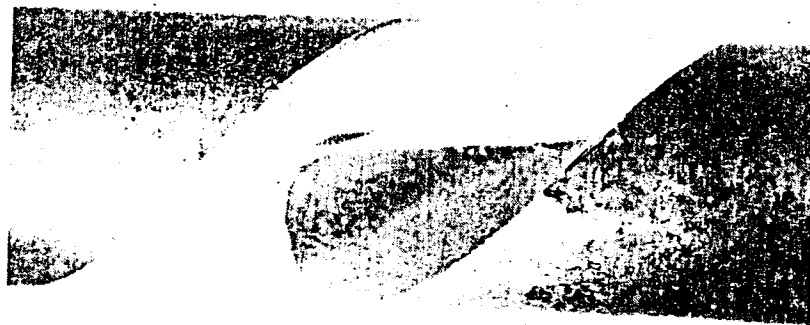
#### 4. Tahap-tahap radial dalam arah perambatan.

Kadang permukaan kepecahan menunjukkan langkah - langkah radial ke arah perambatan.. Langkah-langkah seperti itu dapat berupa hasil merambatnya retak akibat guncangan ringan. Dalam segi kontinuitas, sebuah langkah harus terjadi pada dua tingkat yang berbeda. Seperti pada Al-alloy tempa, jika terdapat deformasi struktur yang pasti. Hal ini berarti orientasinya tidak selalu acak bagi kisi-kisi kristal dari tiap butir (deformasi tekstur), melainkan akan menuju pada deviasi lokal yang kecil dari perambatan tegak lurus pada teganhgan utama. Hasilnya adalah perambatan pada guncangan ringan dan langkah-langkah radial diantaranya. Secara umum langkah-langkah radial dan pita-pita perambatan akan memudahkan untuk menentukan titik dimana retak dimulai.

#### 5. Jumlah dan ukuran retak makro.

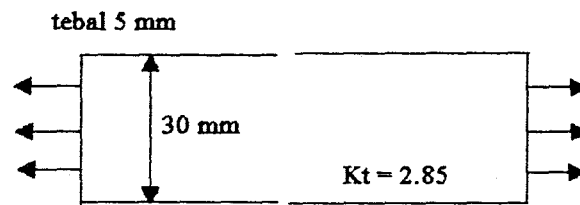


Jika beban fatigue rendah, retak inti akan terjadi pada titik terlemah saja, namun bila beban cukup tinggi memungkinkan retak inti terjadi pada semua lokasi retak awal yang berpotensi. Dalam gambar 3.14b mengilustrasikan satu retak yang dominan yang berhubungan dengan amplitudo tegangan tinggi. Gambar lain yang berhubungan adalah daerah bagian kelelahan. Untuk amplitudo tegangan yang lebih tinggi bagian tersebut lebih kecil karena sigma maks dalam putaran terakhir dari umur kelelahan.

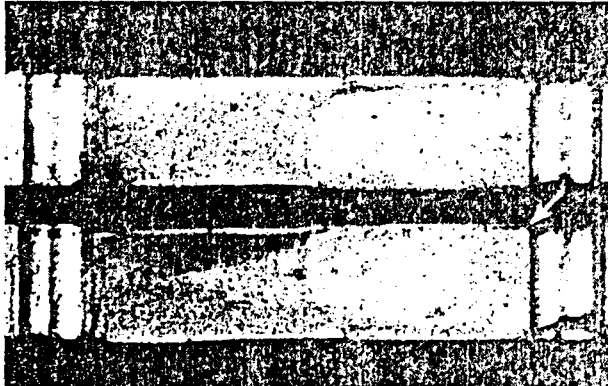


Gambar 3.13 Pertumbuhan retak kelelahan tegak lurus terhadap tegangan utama.  
Putaran torsi pada poros penggerak menyebabkan retak spiral.

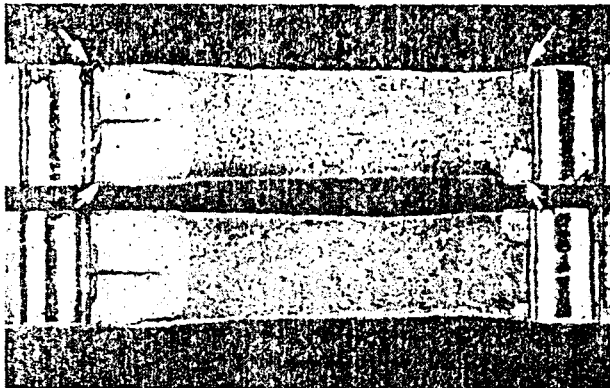
Retak berawal dari permukaan lubang.



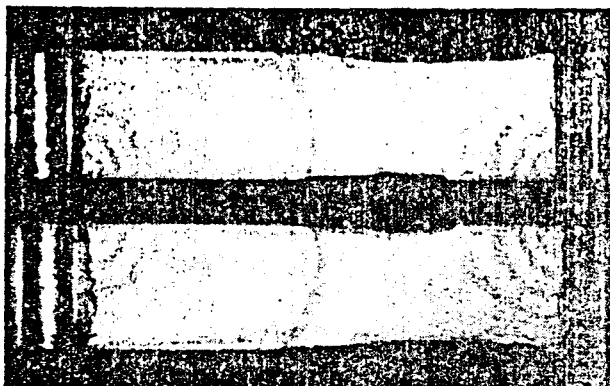
(a) Benda uji dengan takik sisi



(b) Permukaan kepecahan dengan bagian kepecahan yang besar terdapat hanya satu inti.



(c) Permukaan kepecahan dengan bagian kelelahan yang kecil. Empat inti seperti pada tanda panah.



(d) Permukaan kepecahan dengan pita-pita pertumbuhan yang disebabkan karena harga bolak-balik  $\sigma_a$  (tinggi dan rendah).

Gambar 3.14 Permukaan kepecahan benda uji bertakik.

**B. Karakteristik Mikro.****1. Perambatan retak antar kristal.**

Retak karena kelelahan pada material merambat antar kristal (dapat juga transgranular). Retak tersebut tidak mengikuti batasan butir, berlawanan dengan Stress Corrosion Cracking dan perlahan-lahan gagal. Karena perambatan retak merupakan konsekuensi dari langkah berulang, maka retak kelelahan merambat melalui butiran-butirannya. Hambatan pergeseran pada batas butir, minimal untuk sebuah retak antar kristal. Antar kristal alami dapat dengan mudah diamati dengan mikroskop optik.

**2. Striation.**

Dalam analisa kegagalan, karakteristik makro dan mikro yang bermacam-macam dapat lebih membantu. Biasanya tidak sulit membedakan antara retak kelelahan dengan retak karena korosi tegangan. Meskipun keduanya tidak menunjukkan makroplastisitas kadang-kadang kegagalan korosi tegangan menunjukkan ikatan perambatan.

Striation hanya ditemukan pada kelelahan dan kepecahan. Harus diperhatikan bahwa tidak adanya striation tidak terlalu menjelaskan apakah yang terjadi bukan retak

kelelahan, dan tidak semua material menunjukkan striation. Lebih jauh lagi untuk mengetahui striation tergantung pada kecepatan perambatan retak. Pada kecepatan perambatan yang rendah jarak striation mungkin terlalu kecil untuk diamati. Perbedaan paling mendasar adalah pergerakan antar kristal alami dari retak kelelahan dengan retak karena korosi tegangan. Akhirnya struktur serat mempengaruhi jalur kecil pada retak karena korosi tegangan, tapi sukar mempengaruhi arah perambatan retak kelelahan.

## BAB IV

### TINJAUAN ASPEK KOROSI

#### IV. PENDAHULUAN.

Sebelum membahas masalah fatigue korosi terlebih dahulu diterangkan masalah korosi, dan lingkungan yang berpengaruh dalam terjadinya pengkaratan.

Adanya lingkungan korosif dan tegangan yang mengenai suatu struktur akan menyebabkan suatu kegagalan struktur. Kegagalan yang terjadi ini tergantung dari bentuk pembebanan, untuk pembebanan statis maka akan terjadi suatu kegagalan yang disebut Stress Corrosion Cracking sedang untuk suatu beban berulang akan terjadi kegagalan yang disebut dengan Fatigue Corrosion.

Dalam bab ini akan dijelaskan aspek korosi yang juga ada dalam mekanisme fatigue korosi, sehingga dapat diketahui mekanisme korosi itu sendiri dalam material.

#### IV.1. TEORI DASAR KOROSI.

Secara umum *korosi* diartikan sebagai suatu proses kerusakan atau keausan material akibat terjadinya reaksi dengan lingkungan, yang

---

didukung oleh faktor-faktor tertentu. Lingkungan yang menyebabkan kerusakan pada material disebut lingkungan korosif yang terbagi dalam beberapa bagian :[7]

- Lingkungan udara beruap air, destilasi bergaram dan air mineral.
- Polutan industri yang terdiri dari uap air, gas-gas seperti amoniak, hidrogen sulfida, klorin, asam-asam organik.
- Minyak.
- Lingkungan bersuhu tinggi.

Tiap logam maupun paduannya yang bercampur dan bereaksi dalam suatu lingkungan korosif, akan dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut :

### **1. Struktur Material.**

Homogenitas struktur suatu material ditentukan oleh susunan kimia, perlakuan panas dan perlakuan mekanis dari material.

Pekerjaan mekanis akan menyebabkan susunan kristal dalam material akan berubah, sehingga apabila logam berada dalam larutan elektrolit akan terjadi aliran listrik karena sebagian kristal akan menjadi katode bagi kristal lainnya.

### **2. Deformasi Plastis dan Deformasi Elastis.**

Adanya deformasi baik plastis maupun elastis akan meningkatkan free energi sehingga ketahanan logam terhadap korosi berkurang.

Pada waktu pembuatan hampir semua logam terdeformasi, akibat pengerolan menyebabkan permukaan logam mempunyai struktur material yang sifatnya berbeda. Adanya struktur kristal permukaan yang berbeda inilah yang menyebabkan pengkaratan umumnya mengarah pada permukaan.

### **3. Bentuk permukaan logam.**

Permukaan logam mempunyai struktur tersendiri mengenai keaktifannya membentuk lapisan oksida logam yang berfungsi menghambat pengkaratan.

### **4. Sifat-sifat elektrolit.**

- Lapisan elektrolit yang berhubungan dengan logam.

Susunan lapisan elektrolit yang berhubungan dengan logam mempunyai pengaruh pada difusi, hasil pengkaratan, kecepatan reaksi oksigen, jumlah ion yang dikehendaki untuk menutup permukaan logam, dan lain-lain.

- Sifat-sifat umum kimia dan fisika dari elektrolit.

Meliputi besarnya kemampuan menghantar listrik, jenis garam yang melarut atau oksida pada larutan elektrolit tersebut.

### **5. Gerakan elektrolit.**

Gerakan elektrolit akan mempengaruhi kecepatan larutan anode dan mempercepat proses pengkaratan, selain itu gerakan elektrolit ini akan menimbulkan gaya gerak listrik.

## IV.2. PRINSIP DASAR TERJADINYA KOROSI.

### Reaksi Kimia Listrik

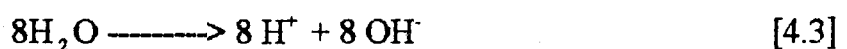
Korosi terjadi akibat adanya reaksi oksidasi dan reduksi antara material dan lingkungannya. Reaksi oksidasi adalah reaksi yang menghasilkan elektron sedang reaksi reduksi menggunakan elektron. Gabungan kedua reaksi ini disebut *reaksi redoks*. Logam yang mengalami reaksi reduksi akan melepas elektron sehingga membentuk ion logam.

Pada sebatang besi yang dicelupkan dalam air, akan terjadi reaksi sebagai berikut :

- Reaksi anode :



- Reaksi pada elektrolit :



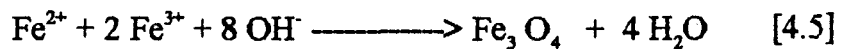
- Reaksi pada Katode :





Pada reaksi di atas akan timbul lapisan tipis hidrogen pada katode yang berfungsi sebagai pelindung terhadap karat. Terjadinya lapisan hidrogen ini tergantung pada kondisi permukaan besi. Apabila permukaan besi sangat licin, maka hidrogen akan sukar melekat.

Selanjutnya ion logam  $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$  akan bereaksi dengan  $\text{OH}^-$  dari air,



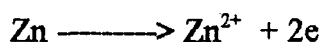
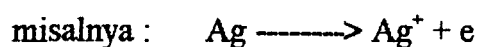
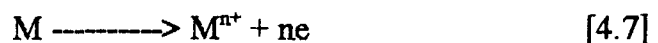
Reaksi pengkaratan besi ini terjadi pada media air yang tidak mengandung oksigen. Untuk air yang mengandung oksigen akan terjadi proses pengkaratan sebagai berikut :



Proses elektrokimia secara umum digambarkan dengan :

### Reaksi Anode

Yaitu terjadinya oksidasi logam yang melepaskan elektron :



### Reaksi Katode

---

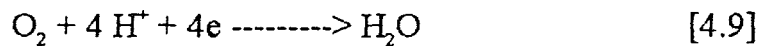
## Reaksi Katode

Secara umum terdapat beberapa bentuk reaksi katode yaitu :

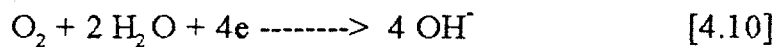
Evolusi Hidrogen dengan reaksi :



Reduksi Oksigen (pada larutan-larutan asam) dengan reaksi :



Reduksi Oksigen (pada larutan-larutan basa) dengan reaksi :



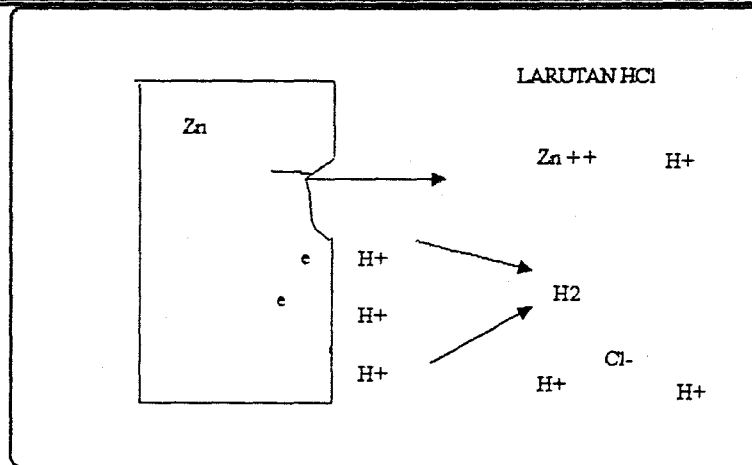
Reduksi ion logam dengan reaksi :



Metal deposition dengan reaksi :



Evolusi hidrogen adalah reaksi yang umum terjadi pada larutan yang berhubungan dengan udara yang mampu menghasilkan reaksi. Sedang reaksi reduksi ion logam dan deposition adalah reaksi yang jarang terjadi, namun reaksi-reaksi diatas sama-sama menerima elektron. Reaksi oksidasi dan reduksi dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.1. Proses terjadinya korosi akibat kimia listrik

### IV.3. FAKTOR PENYEBAB TERJADINYA KOROSI.

Faktor-faktor penyebab terjadinya korosi dapat dibagi menjadi beberapa macam, antara lain :

#### IV.3.1. Sifat-Sifat Material.

##### 1. Pengaruh susunan kimia material.

Semua baja termasuk stainless steel dan paduan komposisi tinggi cenderung mengalami pengkaratan oleh air laut. Hal ini disebabkan bahan dasar baja yang terdiri dari unsur Fe yang bersifat kurang mulia, dan ditambah adanya unsur C sebagai tambahan. Pertambahan kadar karbon dalam baja akan meningkatkan laju korosi, tapi dalam larutan  $\text{HNO}_3$  terjadi proses pasivitas, yaitu pengurangan reaktivitas logam terhadap lingkungan tertentu, dan seolah-olah logam akan bersifat lebih mulia. Sehingga pada

lautan ini High Carbon Steel mempunyai laju korosi lebih rendah dari Low Carbon Steel.

Adanya elemen lain dalam baja akan mempengaruhi korosi, seperti :

- **Sulfur (S)**

Elemen Sulfur sebagai pengotor dalam baja akan bereaksi dengan Fe membentuk sulfida FeS. Sulfida ini akan keluar dari butir memasuki batas butiran yang menyebabkan terjadinya konsentrasi FeS pada butiran yang akan menaikkan laju korosi. Sehingga pada pembuatan baja kadar Sulfur ditahan tidak lebih dari 0.05%.

- **Phospor (P)**

Dalam jumlah sedikit elemen phospor akan larut dalam ferit, namun bila kadar phospor melebihi kemampuan terlarut dalam ferit maka elemen ini akan terlempar keluar ke batas butiran. Sama dengan pengaruh elemen Sulfur, maka kadar phospor dalam baja ditahan tidak lebih dari 0.04%.

- **Mangan (Mn)**

Membentuk karbida dengan karbon yaitu  $Mn_3C$  yang dapat mengurangi pengaruh yang merugikan akibat adanya sulfur, sehingga dapat memperlambat laju korosi. Mangan juga dapat mengurangi cacat pada cor-coran akibat adanya impuriti.

- **Nitrogen (N)**

Apabila Nitrogen terdapat dalam besi atau baja akan memudahkan baja terkena Stress Corrosion Cracking pada larutan alkali atau nitrat. Baja yang mengandung Al mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap Stress Corrosion Cracking karena Al akan bereaksi dengan N terlarut selama pengecoran.

- **Tembaga (Cu)**

Penambahan tembaga pada baja yang mengandung P dan S tinggi akan menurunkan laju korosi pada larutan asam sulfiric, hydrocloris atau citrid acid. Pada besi murni penambahan Cu akan menaikkan laju korosi.

- **Cromium dan Nikel (Cr dan Ni)**

Secara umum penambahan Cr dan Ni akan menaikkan ketahanan terhadap korosi. Pada Alloy 80% Ni -20% Cr akan tahan terhadap korosi erosi dibanding 80% Fe - 20% Cr. Unsur Ni akan meningkatkan ketahanan terhadap Fatigue Corrosion di oil-well brime yang mengandung  $H_2S$ . Dan Cr dengan paduan besi lebih dari 12% menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap korosi dibanding dengan baja karbon Cromium rendah (Low Cromium Carbon Steel).

## **2. Pengaruh Struktur Material.**

Kurangnya homogenitas struktur dapat menimbulkan efek galvanis mikro pada material yang menyebabkan terjadinya pengkaratan. Adanya

titik-titik yang tidak sama terhadap titik-titik di sekitarnya akan menyebabkan salah satu bertindak sebagai katode, dan yang lain sebagai anode. Perbedaan potensial akan menyebabkan terjadi aliran elektrolit bila baja dimasukkan dalam air.

Pada material yang mengalami deformasi berat lebih mudah terjadi korosi, karena butiran dalam material mengalami perubahan bentuk dan susunannya. Pada kondisi demikian material akan lebih reaktif dalam lingkungan yang elektrolit. Proses annealing dilakukan untuk meniadakan pengaruh deformasi pada material.

### **3. Pengaruh Beda Potensial (Efek Galvanis).**

Bila dua logam mempunyai beda potensial tidak sama digabungkan dan dimasukkan dalam larutan elektrolit akan terjadi pengkaratan.

### **4. Pengaruh Bentuk Permukaan Material.**

Permukaan logam yang mempunyai bentuk tersendiri akan menyebabkan terjadinya korosi. Adanya impurity pada permukaan material akan menyebabkan korosi karena terperangkapnya oksigen dalam material.

## **IV.3.2. Faktor Lingkungan.**

Lingkungan adalah faktor yang penting dalam proses korosi. Dalam hal ini yang ditinjau adalah aspek lingkungan laut. Pembahasan

pengaruh-pengaruh lingkungan berdasarkan percobaan dan penelitian, meliputi :

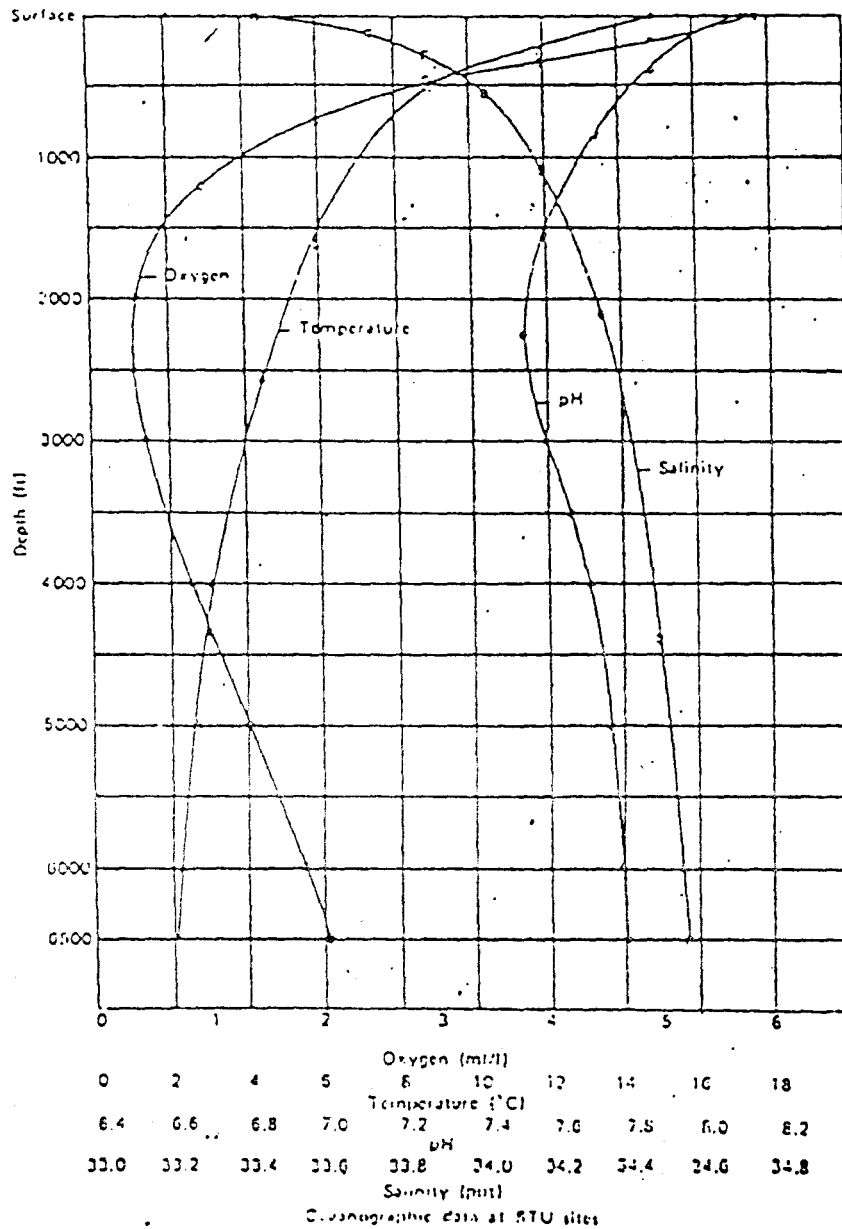
### 1. Komposisi air laut.

Salinitas adalah jumlah gram material padat dalam 1 Kg air laut ketika semua karbonat berubah menjadi oksida, brom dan iodine diganti chlorine dan semua organik teroksidasi dengan sempurna. Atau yang lebih sederhana dari pengukuran jumlah garam ini adalah clorinitas. Dimana clorinitas adalah perkiraan jumlah total (gram) dari chlorine, brom dan iodine yang telah diganti chlorine dalam 1 Kg air laut.

Kadar garam dalam air laut akan menentukan kemampuan penghantar listrik yang berpengaruh terhadap pengkaratan. Pada kenyataannya air laut bukan merupakan larutan kimia yang sederhana dan mengandung banyak bahan carbon dan bicarbon. Kemampuan air laut sebagai penghantar listrik karena air laut banyak mengandung ion-ion antara lain :

Ion	(g/kg)
Total garam	35.1
Sodium	10.77
Magnesium	1.3
Calcium	0.409
Potassium	0.338
Strontium	0.01
Chloride	19.37
Sulphate	2.71
Bromide	0.065
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.026

Pada gambar 4.2 menunjukkan pengaruh kedalaman air terhadap kandungan oksigen, temperatur, pH, dan salinitas yang semuanya berpengaruh besar terhadap proses pengkaratan.



Gambar 4.2 Pengaruh kedalaman air laut terhadap oksigen, temperatur, pH an salinitas



## **2. Pengaruh pH.**

Konsentrasi ion Hidrogen (pH) dalam air laut normal berkisar 6.1 - 8.3. Konsentrasi ini dapat meningkat akibat fotosintesa tumbuhan karena konsentrasi CO tereduksi.

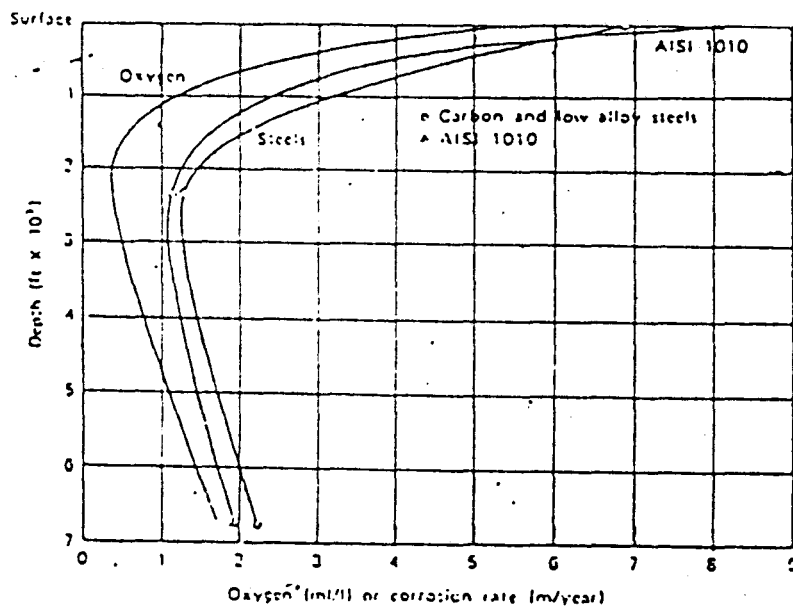
Adanya organisme laut akan mengurangi oksigen dan penurunan pH sampai 8. Konsentrasi hidrogen (pH) tertinggi terdapat di dekat permukaan air yang masih memungkinkan terjadinya fotosintesa, pH terendah terdapat pada kedalaman yang mengandung oksigen rendah (jauh dari permukaan).

## **3. Pengaruh Oksigen.**

Oksigen dalam pengkaratan akan membentuk lapisan pelindung oksida pada logam seperti Al, Ti dan Ag. Kandungan oksigen dalam air laut dipengaruhi oleh salinitas dan temperatur. Bila kandungan oksigen turun maka salinitas akan naik. Kedalaman air laut juga mempengaruhi kadar oksigen dalam air karena kedalaman air juga mempengaruhi fotosintesa dan dekomposisi dari organisme laut. Pada gambar 4.3 akan diketahui pengaruh kedalaman terhadap kandungan oksigen dan korosi

## **4. Deposit Matter (pasir, garam dan lain-lain).**

Pasir, garam dan partikel-partikel lain yang bersifat abrasif menyebabkan terjadinya korosi, karena deposit dapat merusak cat atau pelapis lainnya. Adanya deposit pada permukaan akan menurunkan konsentrasi oksigen sehingga menyebabkan lapisan pelindung oksida sulit terbentuk. Maka dari itu deposit harus dibersihkan secara kontinu.



Gambar 4.3. Pengaruh kedalaman dan oksigen terhadap korosi baja

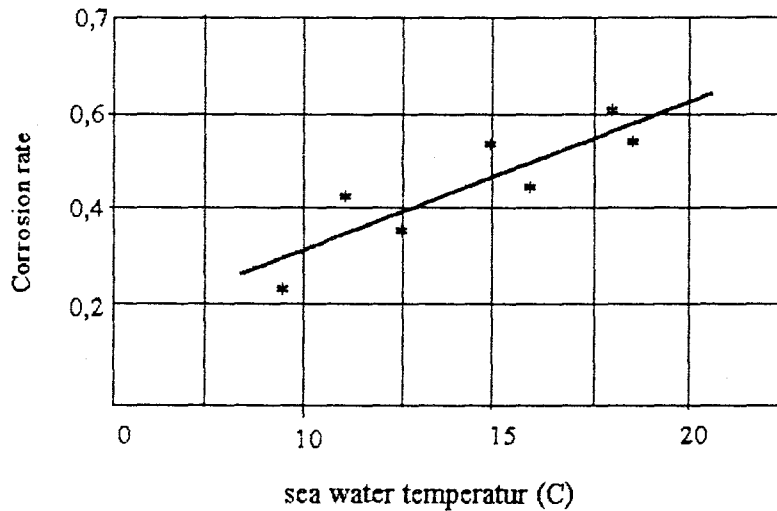
### 5. Mikroorganisme.

Melekatnya mikroorganisme pada struktur dibawah garis air, pada pipa di dasar laut dapat menimbulkan korosi. Melekatnya binatang dan tumbuhan laut selain akan mengurangi kecepatan aliran, juga akan menimbulkan kondisi yang mempercepat terjadinya korosi. Sisa metabolisme mikroorganisme akan menghasilkan senyawa-senyawa aktif dalam pengkaratan seperti  $\text{NH}_4\text{OH}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dan lain-lain, juga asam-asam yang bersifat aktif.

### 6. Pengaruh Temperatur.

Dalam reaksi kimia temperatur mempunyai pengaruh yang besar terhadap kecepatan reaksi. Demikian pula pada proses pengkaratan, temperatur air laut mempengaruhi kecepatan korosi. Bila temperatur makin

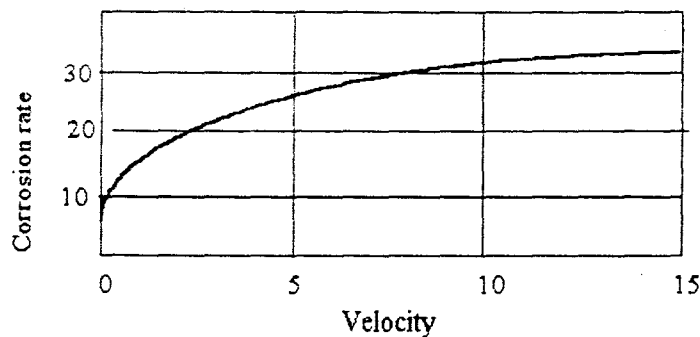
tinggi maka kecepatan korosi makin tinggi pula, dan temperatur tergantung pada kedalaman.



Gambar 4.4 Pengaruh temperatur terhadap laju korosi

#### 7. Pengaruh kecepatan aliran.

Kecepatan aliran air laut akan mengikis permukaan logam, yang berakibat naiknya kecepatan pengkaratan. Karena lapisan tipis pelindung permukaan logam akan terkikis, dan semakin cepat kecepatan aliran maka semakin cepat lapisan terkikis.



Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan aliran terhadap korosi baja

# **BAB V**

## **FATIGUE CORROSION**

### **V.1. PENDAHULUAN.**

*Korosi Fatigue* adalah mekanisme kegagalan yang menghendaki gabungan dari korosi dan tegangan berulang. Korosi Fatigue ini merupakan bagian khusus dari Stress Corrosion Cracking. Korosi dalam hal ini tidak memegang peranan penting, karena adanya lingkungan yang telah memenuhi syarat terjadinya korosi tidak akan banyak berpengaruh tanpa adanya tegangan yang bekerja.

Sebelum kita menerangkan lebih jauh masalah korosi fatigue, terlebih dahulu akan dibahas masalah stress corrosion cracking.

### **V.2. STRESS CORROSION CRACKING.**

*Stress Corrosion Cracking* adalah keretakan yang terjadi akibat adanya tegangan tarik (statis) dan media korosif secara bersamaan[11]. Dalam mekanisme ini haruslah ada tegangan tarik yang mungkin terjadi saat komponen beroperasi, atau tegangan yang sudah ada sejak tahap fabrikasi atau instalasi.

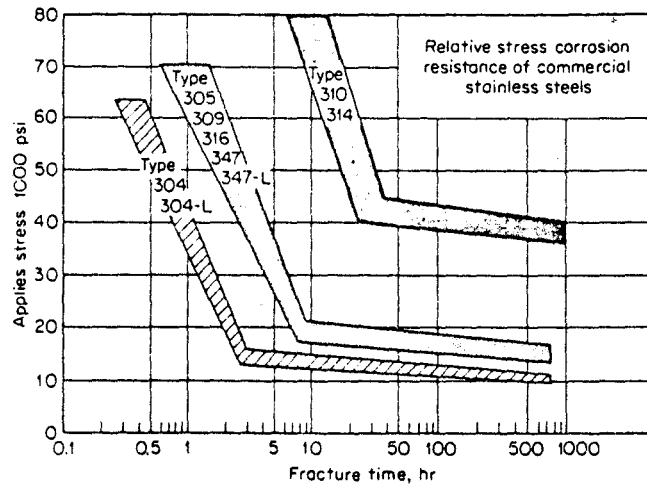
Pada logam paduan lebih rentan terhadap korosi-tegangan dibandingkan dengan logam murni, namun bila tegangan tidak ada, paduan biasanya lebih lembam terhadap unsur yang sama dalam lingkungan, yang semestinya menyebabkan peretakan. Untuk bahan yang memiliki ductilitas tinggi retak korosi tegangan akan nampak seperti kepatahan rapuh.[12]

### **V.2.1 Efek Tegangan.**

Semakin tinggi tegangan yang diberikan maka waktu yang dibutuhkan untuk terjadi keretakan semakin turun. Ada suatu pendapat harus terdapat tegangan minimum untuk menghindari retak, dimana besar tegangan ini tergantung pada komposisi paduan, temperatur dan kondisi lingkungan. Tegangan ini merupakan pembuka dari retak yang kemudian akan membuat tegangan menjadi maksimum pada ujung retak karena adanya peningkatan Stress Concentration Factor (SCF) karena bentuknya yang tajam.

### **V.2.2. Waktu Peretakan.**

Variabel waktu adalah penting dalam fenomena retak korosi tegangan karena kerusakan fisik terjadi pada tahap-tahap akhir. Retak menembus material mengurangi luas penampang lintang dan akhirnya akan terjadi kerusakan sehingga kecepatan retak bertambah dengan bertambahnya kedalaman retak.

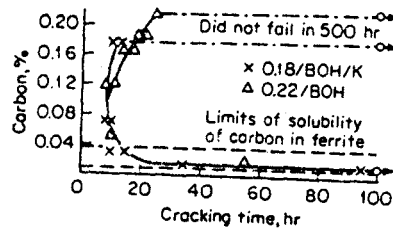


Gambar 5.1 komposisi kurva relatif ketahanan SCC untuk stainless steel dalam 42% magnesium chlorida

### V.2.3. Faktor Metalurgi.

Kerentanan stress corrosion cracking dipengaruhi oleh rata-rata komposisi kimia, orientasi pemilihan butiran, distribusi dan komposisi percepatan, interaksi dislokasi dan kemajuan transformasi fase (derajat metastabil). Faktor-faktor ini akan dipengaruhi kondisi lingkungan dan tegangan sehingga timbul SCC.

Kandungan karbon dalam suatu material baja maupun paduan berpengaruh terhadap retak, dapat dilihat pada gambar 5.2. Logam murni umumnya memiliki ketahanan terhadap retak korosi lebih baik sehingga sering dipakai untuk usaha mencegah terjadinya retak korosi ini.



Gambar 5.2. Pengaruh kandungan karbon terhadap kecepatan korosi [7]

### V.3. STRESS CORROSION PROCESS.

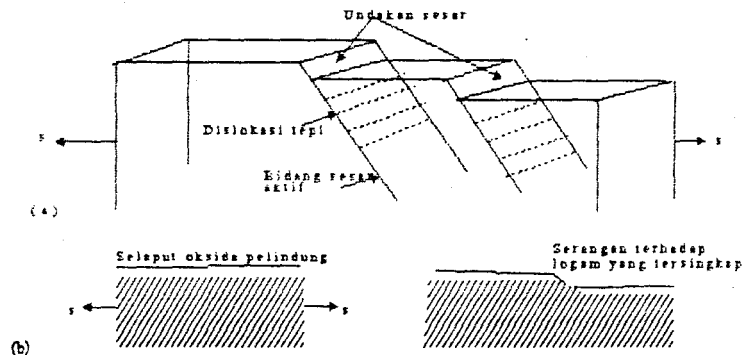
Proses stress corrosion terbagi dalam dua tahap :[11]

1. Tahap Pemicuan (Periode crack nucleation).
2. Tahap Penjalaran Retak (Periode crack propagation).

#### V.3.1. Tahap Pemicuan.

Dalam tahap pemicuan korosi memegang faktor besar. Korosi diawali pada permukaan material yang dikenal dengan korosi basah. Perbedaan potensial pada material tersebut akan menimbulkan reaksi anodik dan katodik. Banyak perbedaan potensial terjadi pada tingkat mikro, terutama pada daerah batas butiran yang dapat menimbulkan perbedaan potensial dari matrik potensial material dari butiran. Beda potensial dapat juga disebabkan oleh variasi electrolyte (kandungan  $O_2$ ). Ini diperkirakan terjadi pada korosi crevice dan korosi pitting.

Pada permukaan yang seharusnya dalam kondisi halus kini telah terbentuk cacat-cacat lokal. Hal ini terjadi akibat adanya mekanisme tegangan yang melebihi tahanan luluh bahan menyebabkan deformasi plastis. Pada kondisi seperti ini ikatan-ikatan struktur logam terputus sehingga logam berubah bentuk secara permanen. Mekanisme ini disebut mekanisme pembentukan atau dislokasi yang terus berlanjut hingga mencapai batas bahan. Cacat-cacat lokal ini disebut undakan sesar (slip step) dan merupakan bagian yang rentan terhadap korosi. Dimana selaput tipis oksida korosi atau bahan pelindung lain akan tersingkap sehingga bagian ini akan menjadi lebih anodik dibanding sekelilingnya.



Gambar 5.3. Peran utama slip step dalam peretakan peka lingkungan

Korosi adalah proses yang kompleks, yang banyak dipengaruhi tipe material, struktur material dan lingkungan. Dalam tahap pemicuan ini korosi adalah proses dasar, tetapi pada tingkat mikro penembusan korosi pada material telah terjadi. Dalam banyak kasus ini terjadi sepanjang batas butiran.



Dipercayai pada tahap pemicuan ini pengaruh dari tegangan tarik tidaklah besar. Bagaimanapun tegangan ini berpengaruh terhadap potensial listrik dalam material.

Setelah serangan korosi mencapai tahap notch microscopial, ada perbedaan situasi :[7]

- Micronotch akan menghasilkan konsentrasi tegangan pada ujungnya. Ini dapat mengubah potensial anodik pada ujung yang mempercepat korosi lokal. Tegangan tarik kemudian menjadi penting.
- Tegangan tarik akan membuka mikronotch yang memberikan jalan pada electrolyte. Takik dapat berfungsi sebagai crevice yang kemudian membuat korosi sebagai kondisi yang tidak menguntungkan.

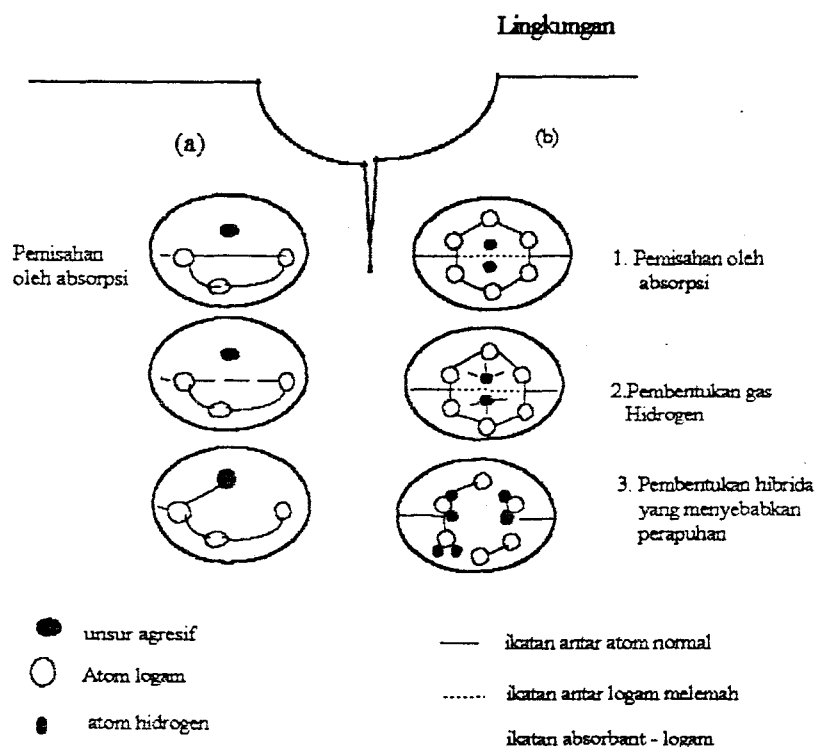
### **V.3.2. Tahap Penjalaran Retak.**

Jika kondisi tersebut ada, korosi permukaan/dasar akan diproses untuk penembusan lebih dalam terhadap material, dan periode penjalaran retak dimulai. Tegangan tarik adalah penting karena akan mempercepat retak pada tingkat lebih tinggi. Tegangan tarik membuka retak dan memberi kesempatan electrolyte masuk sampai pada ujung retak. Tegangan tarik juga dapat menyebabkan beberapa kekenyalan yang akan memperbesar sifat anodik material.

Kontribusi utama dari tegangan tarik adalah untuk meningkatkan kecepatan perambatan retak. Ini tidak sepenuhnya menjelaskan bagaimana tegangan tarik mempercepat mekanisme pertumbuhan retak. Dalam beberapa

material retak korosi tegangan tumbuh lebih atau kurang kontinu, tapi pada material lain kadang nampak terjadi lompatan kecil. Bagaimanapun juga tegangan tarik menunjukkan konsentrasi energi regangan pada ujung retak dan energi ini akan mendorong proses decohesion.

Mekanisasi yang menunjukkan unsur-unsur aktif dalam elektrolit yang dapat menurunkan integritas mekanik bagian ujung retak, sehingga memudahkan pemutusan ikatan-ikatan struktur dalam material. Mekanisme ini disebut *mekanisme absorpsi*.



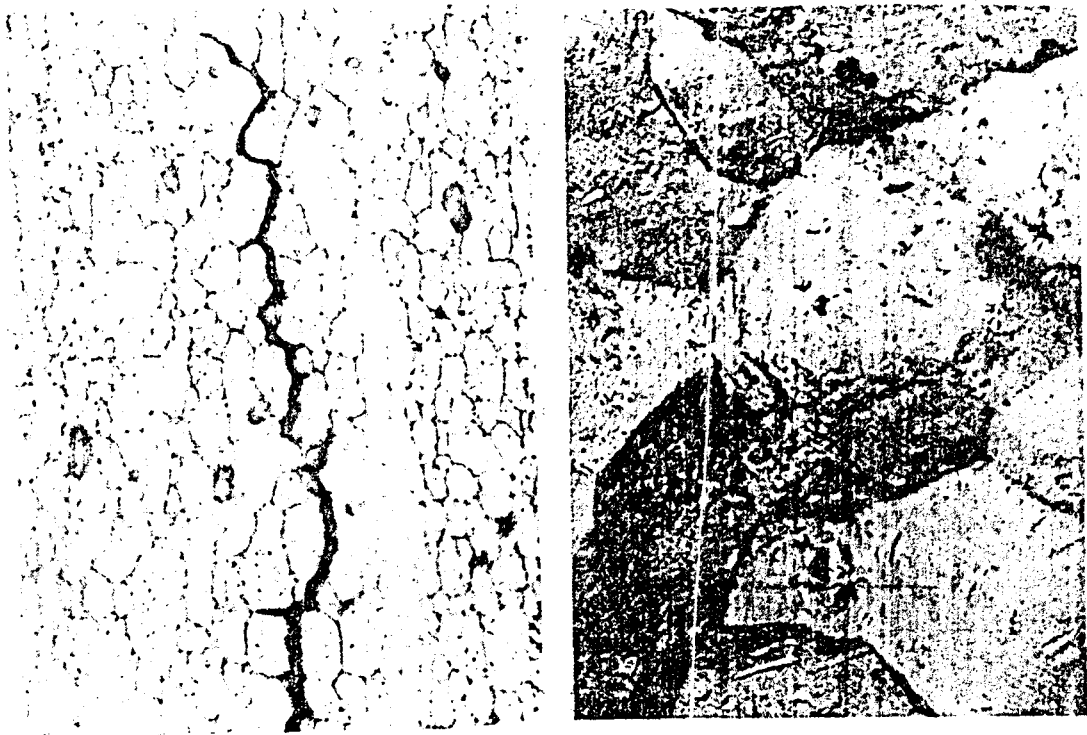
Gambar 5.4 Mekanisme absorpsi oleh ion Hidrogen

Ion-ion agresif yang spesifik untuk tiap kasus diperkirakan mengurangi kekuatan ikatan antar atom diujung retakan dan mengakibatkan terjadinya ikatan antara atom logam dengan unsur agresif tadi. Energi yang dipakai

untuk pengikatan atom logam dengan atom agresor tadi mengurangi energi ikatan antar atom logam sehingga pemisahan secara mekanik lebih mudah terjadi. Ion spesifik tersebut, yang dalam keadaan normal tidak reaktif, menjadi lebih reaktif karena meningkatnya energi termodinamik antara ikatan-ikatan logam akibat tegangan tarik.

#### **V.4. GAMBARAN MIKROSKOPIK DAN MAKROSKOPIK SCC.**

Pada awal mikroskopik SCC terjadi sepanjang batas butiran dalam beberapa struktur material. Khususnya untuk Al-Alloy dan Baja paduan rendah kekuatan tinggi (terutama austenite grain boundaries). Sebagai contoh dari retak intergranular ditunjukkan pada gambar 5.5a. Dimana hubungan ini tersingkap baik dengan mikroskopik-optik (potongan melintang) dan mikroskopik-elektron (replika dari permukaan patah). Gambaran mikroskopik kedua adalah ujung retak bercabang (crack tip branching). Tumbuh disekitar butiran retak akan bertemu dalam tiga titik. Kemudian pertumbuhan dapat terjadi dalam dua arah, sampai salah satu yang terbesar menjadi dominan. Sedang pertumbuhan retak yang lebih pendek akan terhenti karena tidak bertambah panjang dibawah tegangan. Pertumbuhan retak transgranular terjadi pada beberapa material misalnya pada stainless steel dan Ti-alloy.



Gambar 5.5a. Ujung retak (900x). Intergranular crack growth  
5.5b. Permukaan patah (14000x). Grain Boundary facets

Stress Corrosion Cracking dapat terjadi pada tingkat tegangan yang rendah. Sebagai akibat biasanya terjadi tanpa adanya deformasi plastik makroskopik. Seperti ditunjukkan pada gambar 5.5b retak dapat menjadi sangat panjang dan kadang terjadi kegagalan yang sempurna. Dalam kasus lain retak korosi tegangan membebaskan tegangan tarik, sebagai contoh jika hal tersebut adalah tegangan dalam dari material.

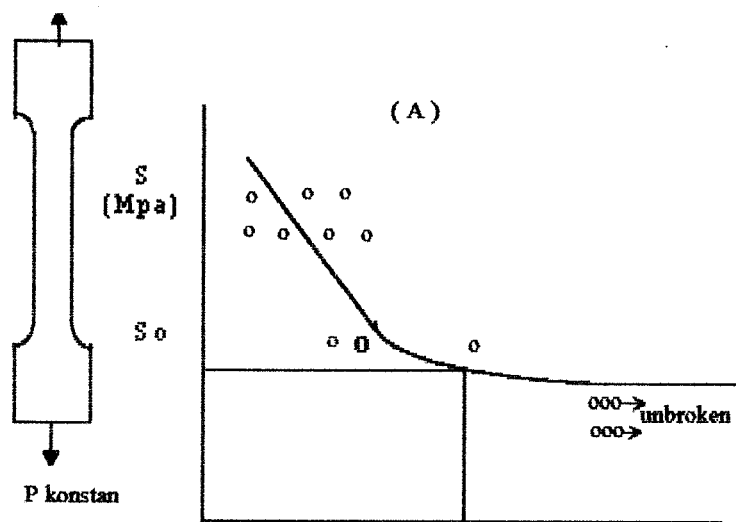
Banyak retak korosi tegangan terjadi pada Al-Alloy tempa dan tuang. Material ini umumnya mempunyai struktur serat yang jelas. SCC tumbuh relatif mudah pada arah serat tersebut ketahanan retak korosi untuk suatu tegangan tarik yang tegak lurus arah serat lebih rendah bila dibanding tegangan tarik searah serat. Ketahanan retak korosi adalah anisotropik untuk

pertumbuhan retak sepanjang batas butiran jalannya lebih mudah apabila jalannya lurus dalam arah serat. Dalam arah melintang jalan yang zig-zag akan membuat pertumbuhan retak lebih sulit.

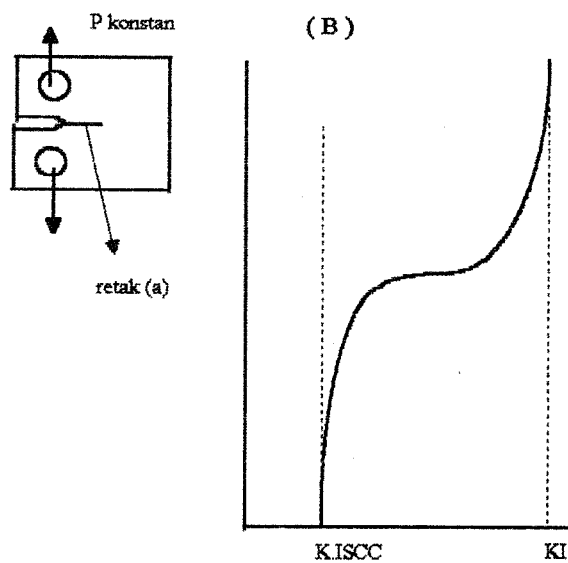
## **V.5. STRESS CORROSION TEST (SCT), VARIABEL DAN TUJUAN PENGETESAN.**

Dua cara berbeda dari penggambaran hasil SCT ditunjukkan pada gambar 5.6 dan 5.7.

Pada gambar 5.6 suatu spesimen tanpa takikan diberikan suatu beban konstan dalam lingkungan korosif untuk mengukur stress corrosion life (SCL). Umur dari struktur diplotkan terhadap fungsi tegangan yang dipakai. Kesamaan dengan kurva fatigue terdapat batas terendah ( $S_o$ ) dimana kegagalan karena korosi tegangan tidak terjadi. Nilai threshold dipertimbangkan sebagai karakteristik untuk kombinasi material dan lingkungan tertentu. Umumnya kurva S-L menunjukkan pembelokan mendadak terhadap asymptot horisontal  $S_o$ . Usia ( $L_o$ ) terjadi dalam variasi yang cukup beragam, bisa 10 jam atau untuk lingkungan yang kurang agresif bisa mencapai 1000 jam.



Gambar 5.6 Hasil pengujian Stress Corrosion Life.



Gambar 5.7 Hasil pengujian retak korosi tegangan (SCC).

Pada gambar 5.7 spesimen compact tension yang diberi retak awal diberi beban konstan. Kecepatan pertumbuhan retak  $da/dt$  dihitung dan diplotkan sebagai fungsi dari faktor intensitas tegangan  $K$ . Harga  $K$  yang lebih besar diharapkan akan memberikan laju retak yang lebih tinggi. Harga  $K_{ISCC}$  adalah harga  $K$  minimum yang diperlukan untuk pertumbuhan SCC yang mengacu pada mode I. Harga ini dianggap sebagai karakteristik untuk kombinasi spesifik material-lingkungan.

Harga kedua  $K_I$  dihubungkan dengan kegagalan statis. Harga-harga ini memiliki kecenderungan terhadap tanjakan horisontal dari kurva  $da/dt$ . Pada kemiringan ini nilai  $da/dt$  tidak tergantung pada  $K$ . Pertumbuhan retak pada daerah ini dipercayai sebagai proses embritling kimia yang membutuhkan waktu yang tak tergantung pada intensitas tegangan.

Terdapat dua macam tipe test yang berbeda :[7]

1. Test yang melibatkan periode nukleasi (nucleation period).
2. Test pada spesimen dengan retak awal, yang menghilangkan periode nukleasi.

Dalam pengujian ini hanya pertumbuhan SCC saja yang dipertimbangkan. Ada beberapa variabel yang dihubungkan dengan material dan lingkungan.

Aspek dari keduanya seperti tertulis dibawah ini :

- Material :
  - Tipe alloy dan perlakuan panas

- struktur material, misalnya arah serat

- Lingkungan :

- tipe lingkungan : - gas (misal udara lembab)

- basah (air, air laut, larutan)

- tipe exposure : - kontinyu ( misal diudara terbuka)

- terputus (basah dan kering bergantian)

- temperatur

Ternyata yang mempengaruhi sifat retak korosi amatlah banyak. Oleh karena itu kita harus mempertimbangkan secara sungguh-sungguh jenis informasi apa yang kita kehendaki.

Kondisi lingkungan yang dapat diterapkan dalam pengujian antara lain

:

1. Exposure udara normal.
2. Exposure udara terbuka. Penempatan spesimen yang bebas terhadap kontaminasi hujan, sinar matahari dan udara.
3. Pencelupan/perendaman penuh kedalam air, air garam, air laut buatan, larutan lain (oksigen jenuh, pH, dan suhu sebagai variabel).
4. Pencelupan berubah-ubah secara periodik basah dan kering.
5. Salt spray cabinet (semprotan air laut/air garam).

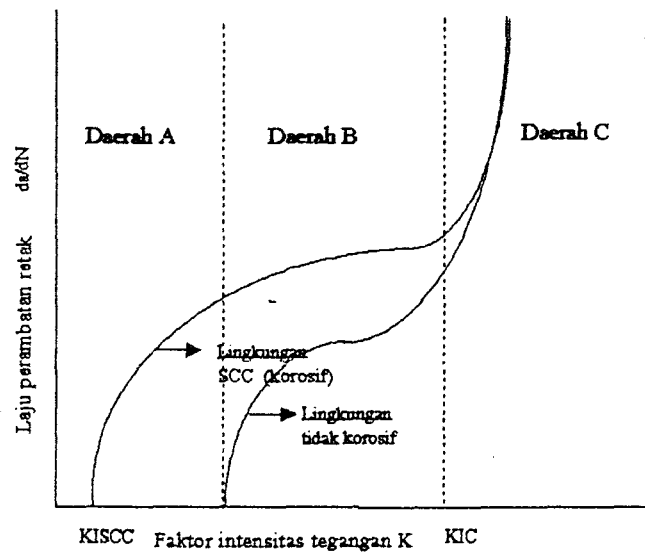


Kondisi service yang ekstrim dapat diperoleh pada exposure atmosfer dekat pesisir laut, namun untuk pengujiannya membutuhkan waktu yang lama. Percepatan pengujian dapat dilakukan dengan memberikan lingkungan yang lebih ekstrim, pencelupan yang berubah-ubah dan penyemprotan (salt spray cabinet) dapat memberikan kondisi yang ekstrim. Dibandingkan dengan pencelupan penuh, pencelupan yang berubah-ubah ternyata lebih ekstrim.

Selain penggunaan lingkungan yang lebih ekstrim cara lain untuk mempercepat terjadinya retak adalah dengan memperbesar beban. Perkembangan yang menarik adalah test dengan peningkatan beban secara perlahan selama test akan menjamin kegagalan akan terjadi pada waktu yang tepat. Biasanya hal ini dilakukan dengan cara semacam itu sehingga peningkatan beban tetap memberikan strain rate konstan.

## **.6. ASPEK-ASPEK PRAKTIS SCC.**

Peretakan korosi tegangan adalah gejala yang kompleks. Pengujian bahan yang rentan terhadap korosi-tegangan memerlukan pemahaman yang memadai terhadap semua faktor yang terlibat. Dalam bab yang terdahulu telah diperlihatkan grafik intensitas tegangan dengan laju perambatan retak dapat dipakai untuk menentukan sifat bahan yang dikenal sebagai ketegaran perpatahan. Jika pengujian dilakukan pada lingkungan yang menunjang SCC atau tidak, maka hasil pengujian dapat digambarkan seperti gambar (5.8).



Gambar 5.8 Kerentanan terhadap SCC dengan pengukuran laju perambatan retak

Data dari percobaan tersebut dapat dikategorikan menjadi 3 bagian.

### 1. Daerah A :

Pertumbuhan retak terkait erat dengan intensitas tegangan tapi laju perambatan turun dengan cepat, hingga menjadi nol. Ekstrapolasi ini menunjukkan intensitas tegangan ambang batas ( $K$  threshold), dibawah nilai ini retak tidak akan terjadi.

### 2. Daerah B :

Ketergantungan pada intensitas tegangan kecil sekali, pertumbuhan retak berlangsung dengan kecepatan hampir konstan yang lebih cepat dari kecepatan perambatan pada lingkungan pembanding dan laju ini dikendalikan oleh korosi.

### 3. Daerah C :

Paksaan mekanik begitu besar sehingga pengaruh lingkungan kurang berperan. Perpatahan tergantung pada intensitas tegangan dan hampir sama dengan spesimen yang diuji pada lingkungan pembanding. Pertumbuhan retak mendekati harga ketegaran perpatahan,  $K_{IC}$ .

Dari grafik ini nampak bahwa untuk bahan yang rentan, laju pertumbuhan retak menunjukkan pergeseran yang umumnya naik dan berada disebelah kiri data dari lingkungan lembam.. Saat harga faktor intensitas tegangan meningkat penyimpangan kedua kurva itu berkurang dan perilaku bahan mendekati perilaku perpatahan yang murni mekanik.

Percobaan menggunakan baja dalam air laut menunjukkan bahwa  $K_{ISCC}$  berkurang bila tegangan luluh bertambah, sehingga dapat disimpulkan bahwa retak korosi tegangan banyak menimbulkan masalah pada baja berkekuatan tinggi.

## V.7. FATIGUE KOROSI.

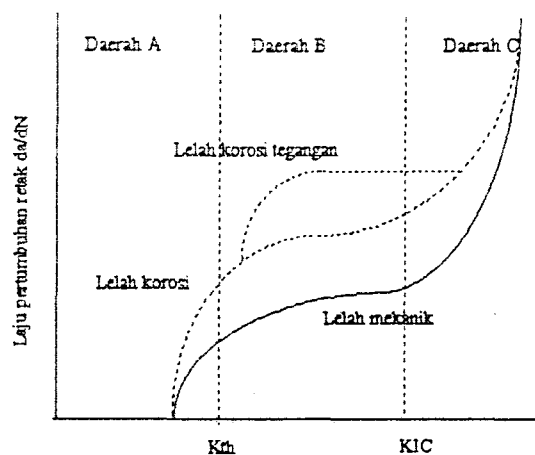
*Fatigue korosi* didefinisikan sebagai penurunan ketahanan fatigue akibat adanya media yang bersifat korosif. *Fatigue korosi* adalah kasus khusus dari stress corrosion cracking.

Tahapan-tahapan perkembangan lelah kurang lebih sebagai berikut :

1. Pembentukan pita-pita sesar yang menimbulkan intrusi atau ekstrusi pada bahan.
2. Nukleasi bakal retakan kurang lebih sepanjang 1 mm
3. Pemanjangan bakal retakan ke arah paling disuka.
4. Perambatan retak tegak lurus tegangan utama maksimum, yang kemudian menyebabkan kegagalan.

Dilingkungan lembam perilaku retak hampir sama dengan perilaku retak di bab 3, tetapi untuk lingkungan basah efek yang timbul pada tegangan rendah lebih besar, dan pada tegangan tinggi perilaku retak lebih menyerupai mekanisme pertumbuhan retak oleh faktor mekanik.

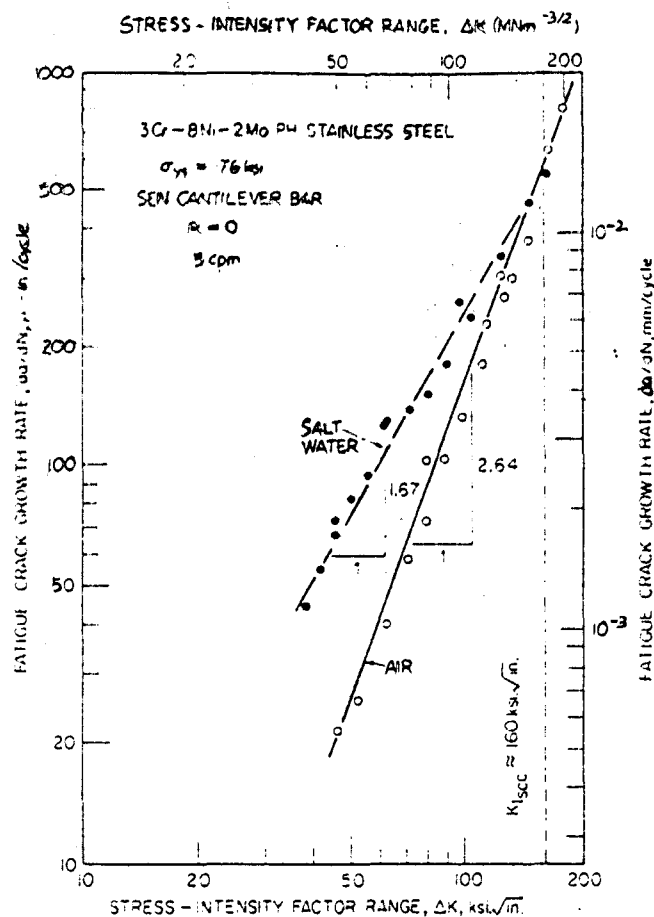
Lelah korosi dapat terjadi pada tingkat tegangan yang jauh lebih rendah dari tingkat tegangan untuk SCC. Faktor yang paling mempengaruhi tingkat ambang batas adalah apakah lingkungan menyebabkan pemicuan retak atau tidak.



Gambar 5.9 Grafik pertumbuhan retak korosi tegangan

Sifat lelah korosi dipengaruhi oleh lingkungan dan material, yang dapat menunjukkan karakteristik material dibawah beban berulang. Perbedaan lingkungan mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap pembebanan material. Dan material yang berbeda akan memberikan sifat lelah korosi yang berbeda.

Pengaruh air laut terhadap kecepatan perambatan retak untuk struktur logam 13Cr-8Ni-2Mo (Stainless Stell) yang diuji pada udara normal dan air laut., dapat dilihat pada gambar 5.10.

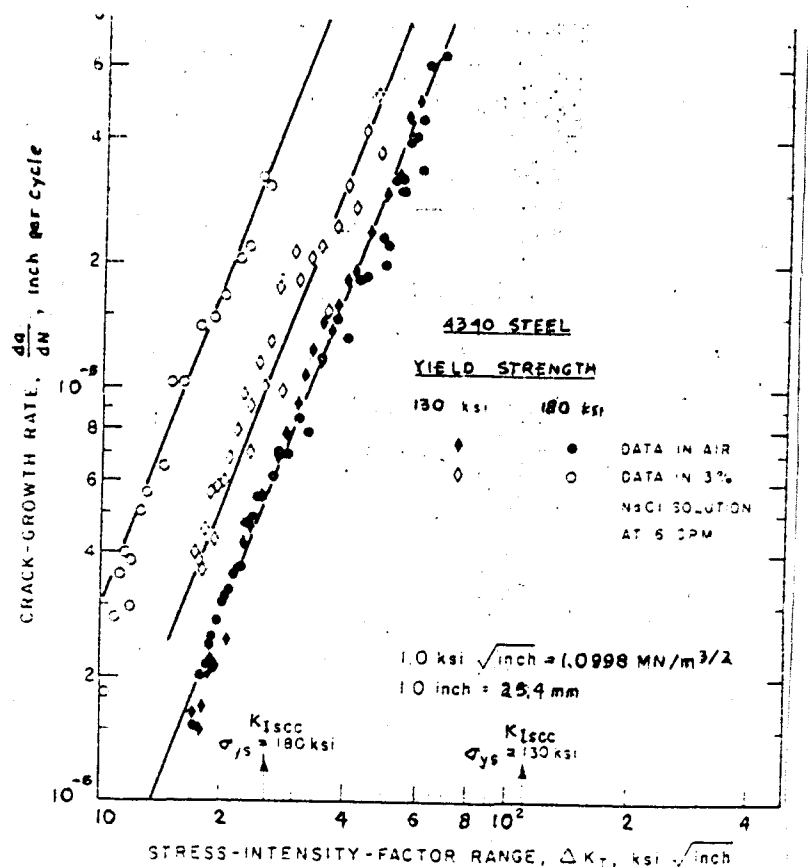


Gambar 5.10. Laju pertumbuhan retak fatigue dari 13Cr-8Ni-2Mo Stainless Steel pada air laut dan udara normal.

### V.7.1. Pengaruh Tegangan Luluh Terhadap Laju Perambatan

#### Retak.

Sifat leleh korosi tegangan dipengaruhi oleh tegangan luluh material. Percobaan dilakukan pada baja 4340 yang mempunyai tegangan luluh (Yield Strength), material pertama memiliki Yield strength 130 ksi dan material kedua, yang telah mendapat perlakuan panas, memiliki yield strength 180ksi. Keduanya diuji pada larutan 3% sodium chloride dengan frekwensi pembebanan 6 cpm. Dari hasil pengujian diketahui material yang memiliki yield strength lebih tinggi mengalami kecepatan pertumbuhan retak sampai 5-6 kali kecepatan retak pada kondisi udara normal-suhu kamar.(gambar 5.11) [10].



Gambar 5.11. Data laju pertumbuhan retak fatigue korosi.

---

### V.7.2. Pengaruh Frekuensi Terhadap Laju Perambatan Retak.

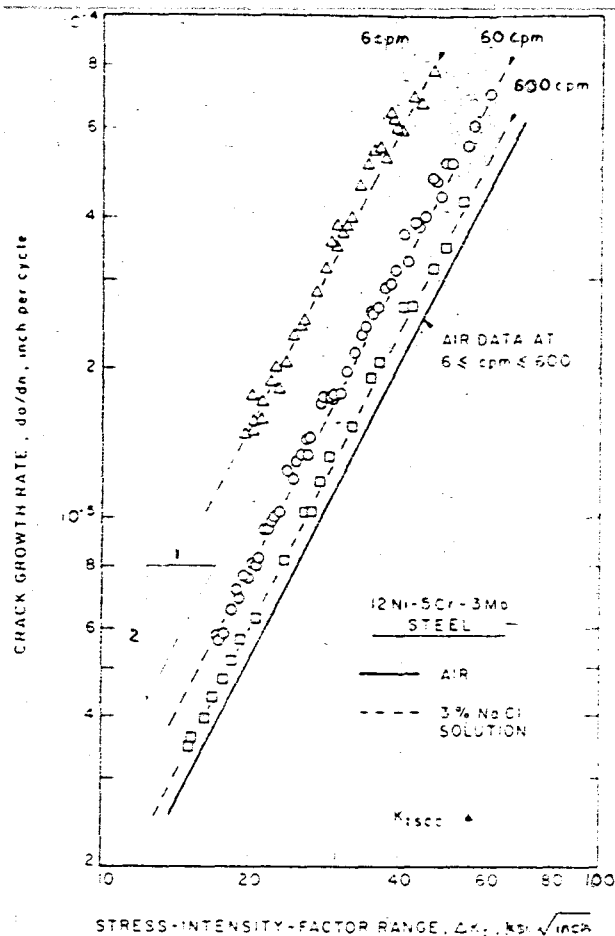
Penyelidikan pertama pengaruh lingkungan dan variabel beban terhadap laju retak fatigue dibawah K dilakukan pada 12Ni-5Cr-3Mo maraging stell dengan yield strength 130 ksi dalam larutan 3% sodium clorida oleh Barsom [10] (gambar 5.12)

Hasil pengujian tersebut mendapatkan rumus empiris :

$$da/dN = D(t) (\Delta K)^2 \quad [5.1]$$

dimana  $D(t)$  adalah fungsi yang tergantung sistem lingkungan - material dan frekuensi pembebanan. Laju pertumbuhan retak dapat dinaikkan atau diturunkan dengan merubah lingkungan, material dan frekuensi pembebanan. Pada kondisi udara normal  $D(t)$  konstan tidak tergantung pada frekuensi pembebanan tapi pada larutan sodium chloride akan nampak perbedaan kecepatan untuk frekuensi yang berbeda.

Pengaruh frekuensi juga diselidiki oleh Vosikovsky [6] yang ditunjukkan pada gambar 5.13 untuk X-65 baja pipa untuk 3,5% air laut dimana kecepatan perambatan lebih tinggi untuk frekuensi pembebanan yang rendah untuk nilai K yang tinggi.



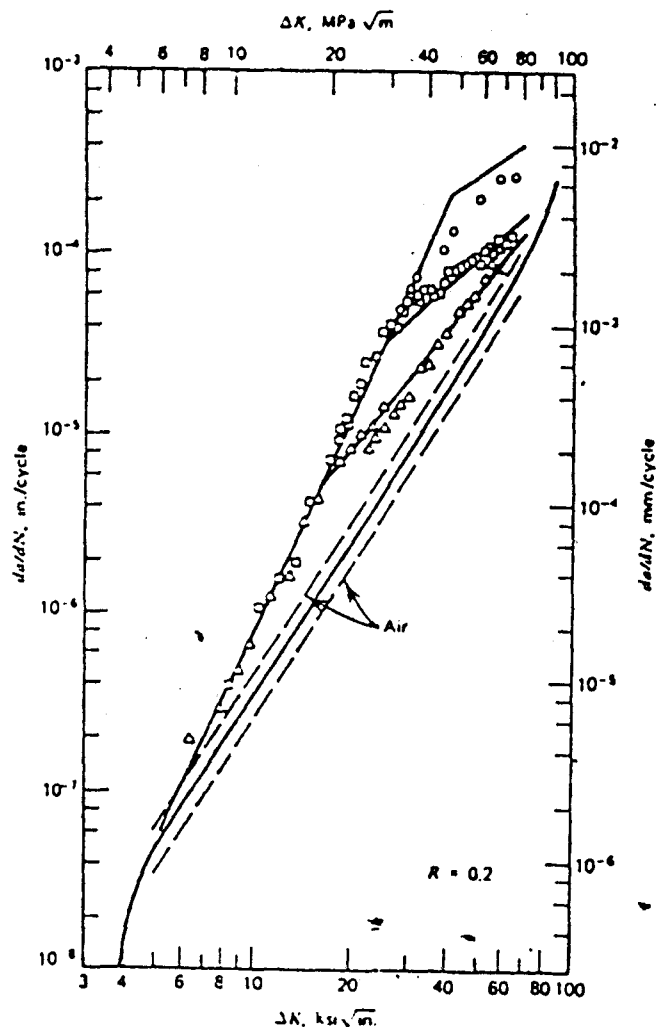
Gambar 5.12 Data perambatan retak fatigue korosi sebagai fungsi dari pengujian frekuensi

### V.7.3. Sifat Fatigue Korosi Di Bawah Kondisi Basah-Kering.

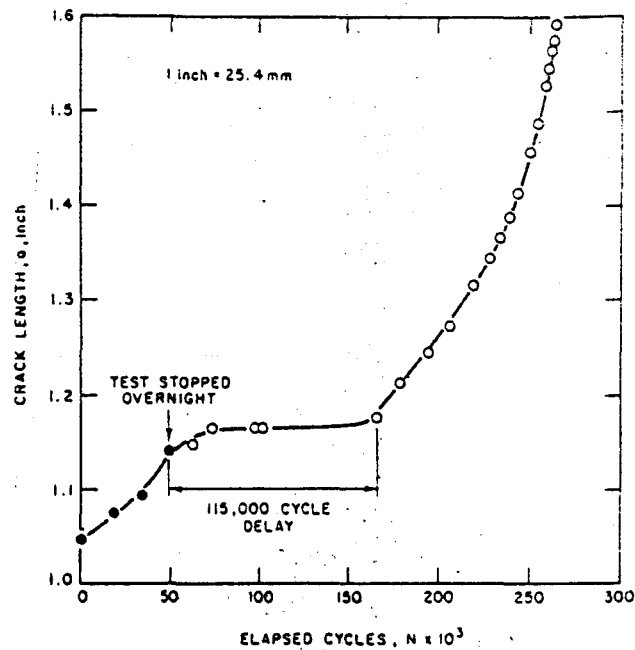
Dibawah kondisi operasi sebenarnya, beberapa struktur ditempatkan pada kondisi basah-kering (berubah-ubah). Pengujian dilakukan pada baja A514 yang dicelup dalam larutan 3% sodium chloride dengan air yang disuling dan diberi frekuensi pembebanan 12 cpm. Kemudian spesimen dipindah dari lingkungan basah ke kondisi kering dengan suhu kamar, baru pada hari berikutnya spesimen kembali dicelup. Data yang dihasilkan dari pengujian ini



adalah adanya perambatan retak yang tidak steady state (konstan) dan hubungan yang kuat dengan umur spesimen. Dari gambar 5.14 tampak adanya perlambatan pertumbuhan retak dan umur spesimen seakan dilipat gandakan, karena diperlukan 115.000 cycle untuk kembali pada kondisi perambatan retak yang konstan

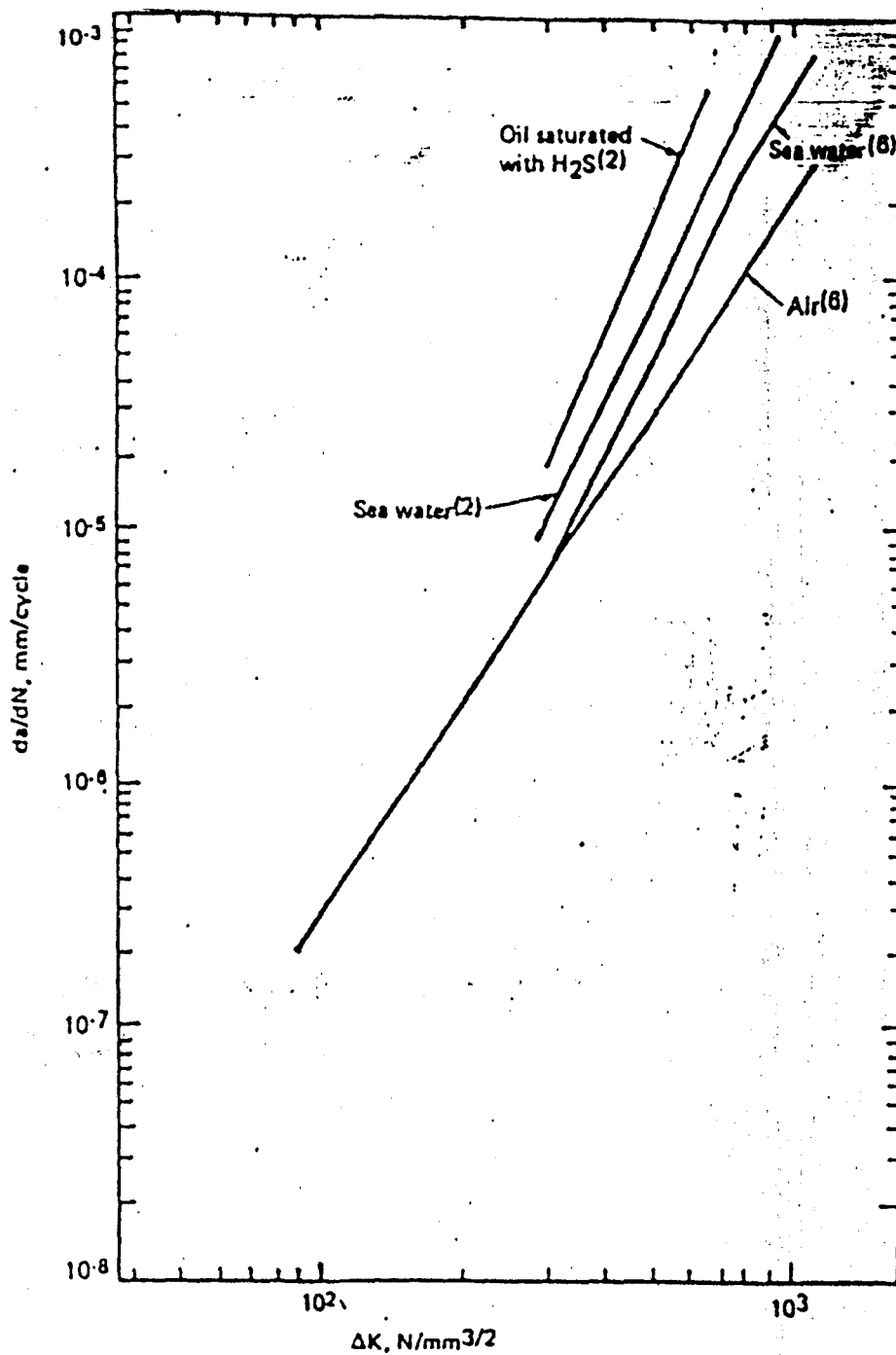


Gambar 5.13 Kecepatan perambatan retak fatigau korosi pada pipa X-65 line pada 3,5% air laut



Gambar 5.14 Perlambatan laju perambatan retak dibawah kondisi lingkungan basah kering untuk baja A514 Grade F

Kecenderungan penurunan pengaruh air laut terhadap pertumbuhan retak diteliti oleh Bristoll, P dan Opdam, J.J.G dan Vosikovsky [15]. Dari grafik (gambar 5.15) terlihat adanya kecenderungan penurunan pengaruh air laut dengan pengurangan kecepatan retak. Blunting crack atau penumpukan ujung retak yang diakibatkan mekanisme dissolution dominan dapat mengurangi kecepatan perambatan retak karena naiknya threshold pada material. Mekanisme strain-hardening, juga menyebabkan penurunan kecepatan, karena adanya daerah plastis disekitar ujung retak sehingga dibutuhkan beban yang lebih besar untuk menjadi daerah elastis.



Gambar 5.15 Pengaruh air laut terhadap perambatan retak pada baja

# **BAB VI**

## **PELAKSANAAN PENGUJIAN**

### **VI.1. PENDAHULUAN.**

Untuk mengetahui tegangan luluh dan tegangan patah (yield stress dan ultimate stress) perlu dilakukan uji tarik material. Pembuatan batang uji tarik berdasarkan pada standar ASTM, dimana bentuk dan ukuran dapat dilihat pada (gambar 6.1) .

Yield stress dan ultimate stress ini perlu diketahui untuk mengetahui batas elastisitas material, sehingga beban dapat direncanakan dengan mudah. Perencanaan beban diperoleh dari kalibrasi yang dilakukan antara mesin uji tarik dengan mesin uji dinamis. Dengan hasil kalibrasi tersebut dapat dipakai sebagai patokan besarnya beban yang dipakai dalam pengujian.

Dengan diketahuinya sifat dari masing-masing material dari uji tarik maka usia kelelahan dapat diperkirakan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara material yang diuji pada kondisi normal (udara dengan temperatur ruangan) dengan material yang disemprot air laut untuk dua jenis material yang berbeda.

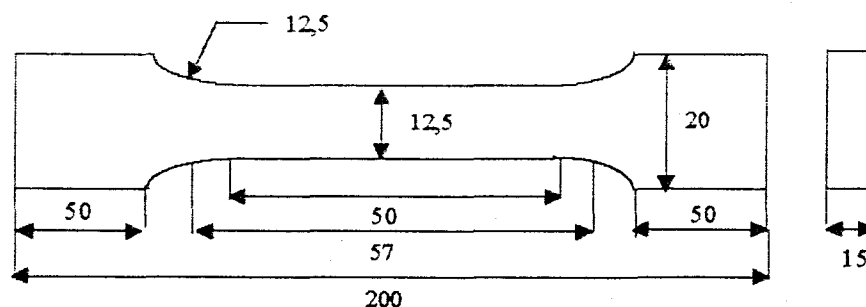
### **VI.2. BENDA UJI (SPESIMEN).**

Material yang dipakai dalam percobaan ini adalah :

- Untuk baja lunak dipakai SS 41 yang termasuk dalam baja dengan kandungan karbon rendah.
- Untuk baja diperkuat dipakai C1045 yang termasuk dalam baja dengan kandungan karbon menengah dan mempunyai kemampuan tarik yang tinggi.

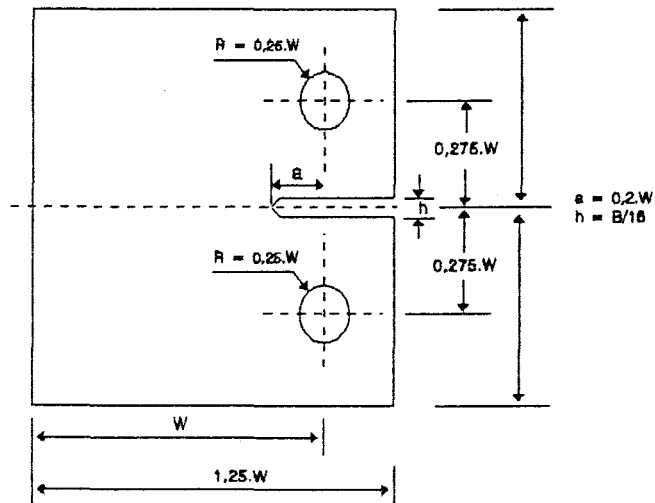
### VI.2.1. Material Uji Tarik.

Spesimen uji tarik dibuat dengan dimensi sesuai dengan ASTM E 8 type sheet. Bentuk dan ukuran dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 6.1 Spesimen untuk uji tarik .

### VI.2.2. Material Uji Dinamis.



Beberapa persyaratan lain yang ada dalam ASTM, walaupun tidak semua persyaratan dapat dipenuhi karena keterbatasan alat, dan kesulitan pembuatan. Persyaratan tersebut antara lain :

1. Model CTS ini direkomendasikan untuk pembebanan berulang tension-compression (tarik-tekan). Tetapi mengingat keterbatasan mesin uji maka beban yang dipakai adalah beban berulang tension-tension (tarik-tarik).
2. Diameter lubang untuk tempat pin diubah ukurannya, dari 0,25W menjadi 0,2W, karena pin (mur-baut) yang tersedia berdiameter

20mm, perubahan ini dianggap tidak berarti karena selama pengujian pin masih dalam kondisi baik.

3. Takikan / notch (a) pada spesimen ini paling tidak berukuran  $0,2W$ . Dan untuk percobaan ini ukuran  $a = 20 \text{ mm}$ .
4. Ketebalan benda uji (b) direkomendasikan pada range  $W/20$  dan  $W/4$ . Tebal benda uji yang dipakai  $15 \text{ mm}$ , masih berada dalam range  $5 \text{ mm}$  dan  $25 \text{ mm}$ .
5. Agar hasil dari metode percobaan ini valid, ukuran spesimen harus memenuhi rumus berikut :

$$\text{Rumus CTS : } W-a \geq 4/\pi (K_{\max}/\sigma_{ys}) \quad [6.1]$$

dimana :

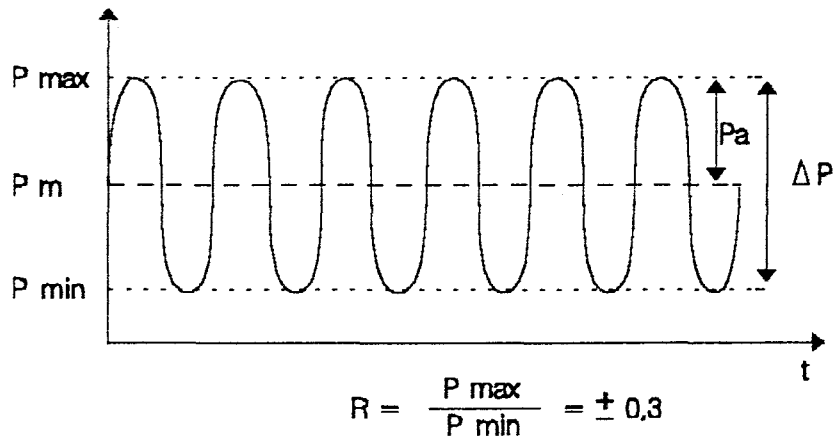
$W-a$  = Lebar benda uji yang tidak retak

$\sigma_{ys}$  = 0.2% offset yield strenght

$K_{\max}$  = Nilai stress intensity factor yang terbesar dari pembebanan maksimum.

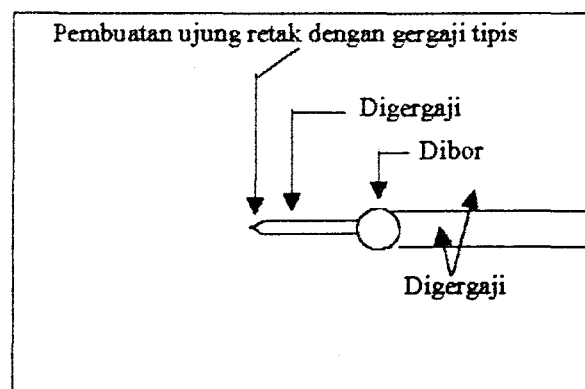
Rumus ini diperlakukan agar ukuran yang didapat masih dalam batas dominan elastis. Tapi rumus ini hanya berlaku untuk kondisi/temperatur tertentu, serta tidak ada perubahan lingkungan. Dalam pengujian ini penyemprotan dengan air laut akan menyebabkan korosif, berarti telah terjadi

perubahan lingkungan yang mempengaruhi laju perambatan retak, sehingga rumus ini tidak berlaku.



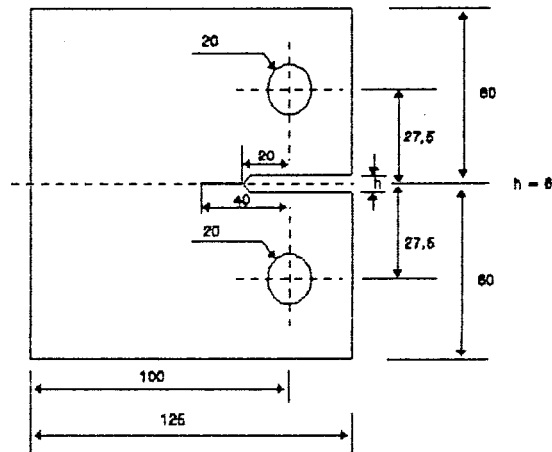
Gambar 6.3 Beban yang dipakai

Untuk menghindari adanya tegangan sisa karena panas pemotongan, tiap spesimen ukuran panjang dan lebarnya pada proses awal pembuatan dilebihkan 3-5 mm. Kelebihan ini kemudian diskrap. Proses pembuatan dapat dilihat pada gambar 6.4 dan bentuk serta ukuran spesimen yang dipakai secara lengkap dapat dilihat pada gambar 6.5.



Gambar 6.4 Detail retak dan cara pembuatannya





Gambar 6.5 Bentuk spesimen yang dipakai.

### VI.3. PELAKSANAAN PENGUJIAN.

#### VI.3.1. Kalibrasi beban.

Sebelum diadakan percobaan, perlu diadakan penyetaraan beban antar load cell kecil dari mesin uji statis dengan indikator ada mesin uji dinamis. Sehingga dapat diketahui besaran dari strain indikator dari mesin sesuai dengan beban yang akan diterapkan. Dari kalibrasi diperoleh hasil sebagai berikut :

Beban Mesin Statis (kN)	Strain Indicator	Beban mesin Statis (kN)	Strain Indicator
1	49	26	1311
2	96	27	1365
3	153	28	1410
4	207	29	1470
5	249	30	1518
6	301	31	1566
7	354	32	1578
8	407	33	1671
9	454	34	1717
10	504	35	1769
11	557	36	1820
12	608	37	1868
13	654	38	1920
14	705	39	1969
15	758	40	2020
16	796	41	2074
17	861	42	2117
18	906	43	2178
19	961	44	2222
20	1016	45	2272
21	1059	46	2320
22	1105	47	2376
23	1173	48	2427
24	1216	49	2475
25	1270	50	2524

Tabel 6.1 Tabel kalibrasi beban.

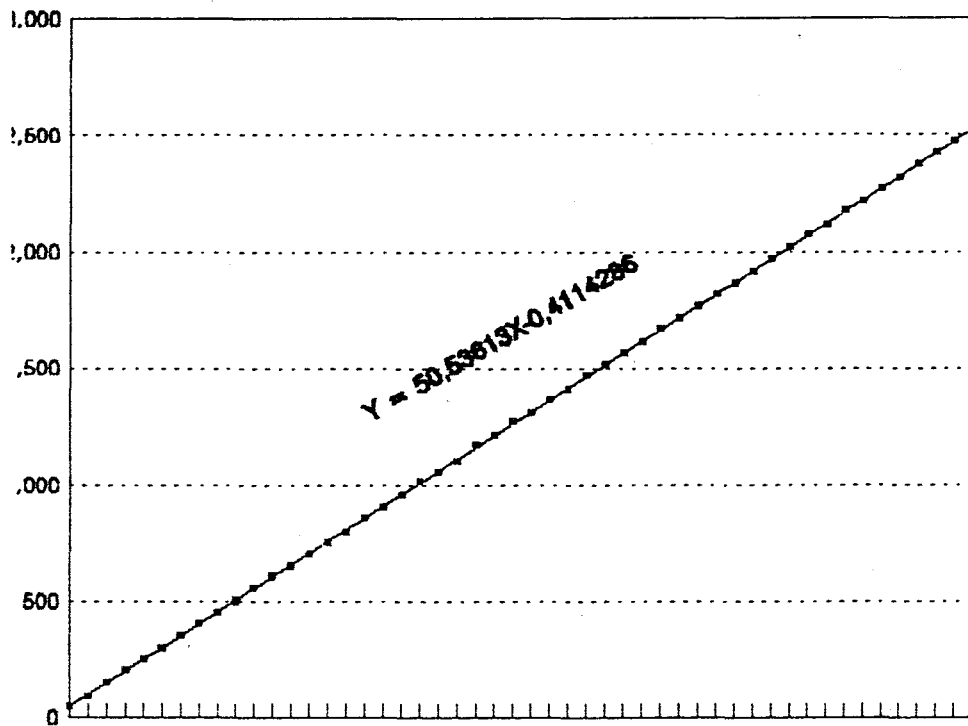
Berdasar hasil pengamatan kalibrasi tersebut dapat dibuat regresi linier dan persamaan garisnya.

Persamaan yang mewakili grafik kalibrasi tersebut adalah :

$$Y = 50,53613.X - 0.4114286 \quad [6.2]$$

dimana : - X = beban statis (kN)

- Y = indikator load cell.



Gambar 6.6 Grafik kalibrasi beban.

### VI.3.2. Pengujian Statis.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui mechanical properties (sifat mekanik) material, yang meliputi yield stress, ultimate stress dan elongation.

Dari hasil pengujian statis didapat besarnya tegangan seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Material	Pengujian Tarik		
	Yield Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Ultimate Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SS 41	29.98	47.68	38.9
C1045	44.88	74.46	20.44

Tabel 6.2 Tabel hasil uji tarik.

### VI.3.3. Pengujian Dinamis.

#### 1. Prosedur percobaan.

Pengujian ini dilakukan dengan memakai amplitudo pembebanan konstan. Beban yang direncanakan adalah tension to compession, karena kemampuan dan keterbatasan mesin maka beban yang dipakai adalah tension to tension.

Frekwensi yang dipakai adalah 2 Hz, frekwensi sebesar ini adalah cukup ideal dari mesin uji karena akan memudahkan pengaturan beban maksimum dan minimum.

Setelah mesin dan benda uji telah siap, maka eksperimen dilakukan dengan dua macam perlakuan. Perlakuan pertama adalah pengujian yang dilakukan pada kondisi normal (udara normal) dan perlakuan kedua adalah dengan melakukan penyemprotan air laut pada spesimen selama pengujian berlangsung. Penyemprotan dilakukan dua kali dalam satu kali penghitungan, pertama dilakukan saat mesin berhenti atau saat dilakukan pengukuran pada

tiap 1000 cycle, dan penyemprotan kedua dilakukan saat mesin berjalan yaitu tiap penambahan 500 cycle.

Penyemprotan ini dilakukan selain untuk mendapatkan kondisi korosif juga untuk mendapatkan pengaruh aliran dan tekanan air saat disemprotkan pada benda uji yang sedang dibebani.

Pengukuran penambahan panjang retak ( $\Delta a$ ) dilakukan dengan bantuan travelling microscope yang letaknya disesuaikan dengan kedudukan benda uji. ASTM telah menyebutkan pengukuran penambahan retak sesuai dengan rumus berikut :

$$\Delta a \leq 0,04 W \text{ untuk } 0,25 \leq a/W < 0,4 \quad [6.3]$$

$$\Delta a \leq 0,02 W \text{ untuk } 0,40 \leq a/W < 0,6 \quad [6.4]$$

$$\Delta a \leq 0,01 W \text{ untuk } a/W \geq 0,6 \quad [6.5]$$

Pengukuran dilakukan saat mesin berhenti, dan secara keseluruhan penambahan retak masih memenuhi persyaratan diatas yaitu :

$$\Delta a \leq 0,2 W (2 \text{ mm}) \text{ untuk } a/W = 0,6 \quad [6.6]$$

dalam percobaan ini dilakukan pencatatan data-data : penambahan retak, siklus pembebanan, nilai beban maksimum dan minimum pada strain indikator.

## 2. Penentuan Beban.

Rencana penentuan beban yang akan digunakan adalah  $0,3\sigma$  yield, karena keterbatasan mesin maka yang digunakan adalah sebesar  $0,25 \sigma$  yield yaitu :

- Hasil tes tarik untuk spesimen I (SS 41)

$$\sigma \text{ yield} : 29,98 \text{ kgf/mm}^2$$

- rencana  $\sigma$  application =  $0,25 \sigma \text{ yield} = 7,495 \text{ kgf/mm}^2$
- Perhitungan strain indicator :

$$- F_{app} = A \times \sigma_{app} = 900 \times 7,495 = 6745.5 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ Kgf} = 9.807 \text{ N, maka } F_{app} = 66,132 \text{ KN}$$

$$\text{Pada strain indicator} = (50,53613 \times 66,132) - 0,4114268$$

$$= 3341,644 \quad [6.7]$$

Untuk spesimen II (C1045) dipakai beban yang besarnya sama dengan beban yang digunakan untuk spesimen I, sehingga  $\sigma_{app}$  lebih kecil dari  $0,25\sigma$  yield. Hal ini dilakukan untuk dapat membandingkan laju perambatan retak pada dua jenis material yang berbeda dengan besar beban yang sama. Karena keterbatasan mesin maka beban maksimum yang dipakai adalah 3000. Dan range beban yang dikenakan pada material hanya berkisar 19 KN saja.

### 3. Pelaksanaan Pengujian.

Pengujian dilakukan dua kali pada masing-masing material, yaitu pengujian pada kondisi normal dan dengan penyemprotan air laut tiap 500 cycle.

#### Hasil Pengujian :

No	Cycle	Strain Indicator Maksimum	Strain Indicator Minimum	Beda Indicator	a (mm)	da (mm)	arata
1					40		
2	12000	3025	2060	965	42	2	41
3	13000	3060	2095	965	42.48	0.48	42.24
4	14000	3050	2050	1000	42.68	0.2	42.58
5	15000	3006	2030	976	42.88	0.2	42.78
6	16000	3040	2070	970	43.08	0.12	42.98
7	17000	3020	2015	1005	43.2	0.12	43.18
8	18000	3070	2040	1030	43.35	0.15	43.28
9	19000	3000	2030	970	43.7	0.35	43.53
10	20000	3010	2030	980	44.7	1	44.2
11	21000	3020	2040	980	44.9	0.2	44.8
12	22000	3010	2030	980	45.35	0.45	45.13
13	23000	3010	2030	980	45.85	0.5	45.6
14	24000	3010	2030	980	46.2	0.35	46.03
15	25000	3010	2030	980	46.7	0.5	46.45
16	26000	3005	2025	980	48	1.3	47.35
17	27000	3010	2030	980	48.65	0.65	48.33

Tabel 6.3 Hasil pengujian spesimen I (SS41) pada udara normal.

No	Cycle	Strain Indicator Maksimum	Strain Indicator Minimum	Beda Indicator	a (mm)	da (mm)	arata
1					40		
2	6500	3050	2035	1015	40.42	0.42	40.21
3	7500	3066	2036	1030	40.9	0.48	40.66
4	8500	3050	2090	960	41.16	0.26	41.03
5	9500	3092	2092	1000	41.54	0.38	41.35
6	10500	3005	2067	938	41.73	0.19	41.635
7	11500	3010	2040	970	42.31	0.58	42.02
8	12500	3010	2020	990	42.91	0.6	42.61
9	13500	3010	2020	990	43.23	0.32	43.115
10	14500	3010	2020	990	43.845	0.615	43.538
11	15500	3020	2025	995	44.735	0.89	44.29
12	16500	3020	2015	1005	45.14	0.405	44.938
13	17500	3020	2020	1000	46.16	1.02	45.65
14	18500	3030	2010	1020	47.205	1.045	46.683
15	19500	3015	2020	995	48.52	1.315	47.863
16	20500	3020	2005	1015	51.92	3.4	50.22

Tabel 6.4 Hasil pengujian spesimen II (C1045) pada kondisi normal.

No	Cycle	Strain Indicator Maksimum	Strain Indicator Minimum	Beda Indicator	a (mm)	da (mm)	arata
1					40		
2	6500	3035	2020	1015	40.45	0.45	40.225
3	7500	3010	2020	990	41.3	0.85	40.875
4	8500	3020	2025	995	41.85	0.55	41.575
5	9500	3040	2020	1020	42.2	0.35	42.025
6	10500	3015	2010	1005	42.8	0.6	42.5
7	11500	3005	2015	990	43.1	0.3	42.95
8	12500	3020	2020	1000	43.5	0.4	43.3
9	13500	3025	2020	1005	44	0.5	43.75



10	14500	3045	2020	1025	44.7	0.7	44.35
11	15500	3070	2065	1005	45.25	0.55	44.975
12	16500	3030	2015	1015	46	0.75	45.625
13	17500	3030	2015	1015	47	1	46.5
14	18500	3010	2020	990	47.8	0.8	47.4
15	19500	3005	2005	1000	48.2	0.4	48
16	20500	3005	2010	995	49.1	0.9	48.65

Tabel 6.5 Hasil pengujian spesimen III (SS 41) pada air laut/500 cycle.

No	Cycle	Strain Indicator Maksimum	Strain Indicator Minimum	Beda Indicator	a (mm)	da (mm)	arata
1					40		
2	10000	3020	2015	1005	40.53	0.53	40.265
3	11000	3015	2010	1005	40.72	0.19	40.625
4	12000	3015	2010	1005	41.22	0.5	40.97
5	13000	3015	2010	1005	41.79	0.57	41.505
6	14000	3010	2015	995	42.46	0.67	42.125
7	15000	3020	2015	1005	43.11	0.65	42.785
8	16000	3020	2020	1000	43.81	0.7	43.46
9	17000	3070	2030	1040	44.71	0.9	44.26
10	18000	3015	2050	965	45.65	0.94	45.18
11	19000	3050	2045	1005	46.66	1.01	46.155
12	20000	3050	2070	980	47.71	1.05	47.185
13	21000	3010	2045	965	48.85	1.14	48.28
14	22000	3010	2020	990	49.95	1.1	49.4
15	22865	3005	2025	980	failure		

Tabel 6.6 Hasil pengujian spesimen IV (C1045) pada air laut / 500 cycle.

#### 4. PENGOLAHAN DATA HASIL PENGUJIAN.

##### 1. Perhitungan Range Factor Intensitas Tegangan.

Perhitungan untuk range Faktor Intensitas Tegangan ( $\Delta K$ ) memakai ASTM E-647 valid untuk  $\alpha$  ( $W/a$ )  $> 0.2$ . Rumus yang dipakai berdasarkan bentuk spesimen yaitu :

$$\Delta K = (\Delta P/B \sqrt{W}) \left\{ (2 + \alpha)/(1 + \alpha)^{3/2} \right\} \{ 0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 - 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4 \} \quad [6.7]$$

Dimana :  $B$  (tebal pelat) = 15 mm

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$$

$$\alpha = a/W = (40/100) = 0.4 \text{ (valid)}$$

Pendekatan grafik dengan memakai Rumus Paris :

$$da/dN = c (\Delta K)^m \quad [6.8]$$

rumus ini diubah menjadi :

$$\log (da/dN) = \log c + m \log (\Delta K) \quad [6.9]$$

Data hasil perhitungan :

No	a (mm)	arata	arata/W	$\Delta P$	$\Delta K$
1	40				
2	42	41	0.41	19.779	31190.43
3	42.48	42.24	0.4224	19.087	31119.767
4	42.68	42.58	0.4258	19.087	31408.282
5	42.88	42.78	0.4278	19.779	32724.752
6	43.08	42.98	0.4298	19.779	32903.944
7	43.2	43.18	0.4318	19.305	32291.723
8	43.35	43.275	0.43275	19.186	32176.404
9	43.7	43.525	0.43525	19.879	33568.549
10	44.7	44.2	0.442	20.373	35051.312
11	44.9	44.8	0.448	19.186	33566.837
12	45.35	45.125	0.45125	19.834	35019.129
13	45.85	45.6	0.456	19.834	35492.984
14	46.2	46.025	0.46025	19.834	35925.516
15	46.7	46.45	0.4645	19.834	36366.415
16	48	47.35	0.4735	19.834	37329.016
17	48.65	48.325	0.48325	19.834	38418.978

Tabel 6.7 Perhitungan Stress Intensity Factor spesimen I (udara normal).

No	a (mm)	arata	arata/W	$\Delta P$	$\Delta K$
1	40				
2	40.42	40.21	0.4021	20.373	31459.094
3	40.9	40.66	0.4066	20.076	31373.121
4	41.16	41.03	0.4103	20.373	32152.89
5	41.54	41.35	0.4135	18.988	30224.794
6	41.73	41.635	0.41635	17.999	28870.604
7	42.31	42.02	0.4202	18.553	30069.967
8	42.91	42.61	0.4261	19.186	31596.967
9	43.23	43.115	0.43115	19.582	32696.78
10	43.845	43.538	0.43538	19.582	33078.408
11	44.735	44.29	0.4429	19.582	33774.874

12	45.14	44.938	0.44938	19.681	34566.065
13	46.16	45.65	0.4565	19.879	35624.087
14	47.205	46.683	0.46683	19.779	36509.733
15	48.52	47.863	0.47863	20.175	38547.129
16	51.92	50.22	0.5022	19.681	40378.66

Tabel 6.8 Perhitungan Stress Intensity Factor spesimen II (udara normal).

No	a (mm)	<i>arata</i>	<i>arata</i> /W	$\Delta P$	$\Delta K$
1	40				
2	40.45	40.225	0.40225	20.076	32120.08
3	41.3	40.875	0.40875	19.582	30776.925
4	41.85	41.575	0.41575	19.681	31517.671
5	42.2	42.025	0.42025	20.175	32703.391
6	42.8	42.5	0.425	19.582	32152.816
7	43.1	42.95	0.4295	19.879	33043.194
8	43.5	43.3	0.433	19.779	33193.683
9	44	43.75	0.4375	19.879	33777.522
10	44.7	44.35	0.4435	20.274	35026.913
11	45.25	44.975	0.44975	19.879	34950.649
12	46	45.625	0.45625	20.076	35951.568
13	47	46.5	0.465	20.076	36863.205
14	47.8	47.4	0.474	19.582	36908.712
15	48.2	48	0.48	19.779	37944.47
16	49.1	48.65	0.4865	19.681	38494.59

Tabel 6.9 Perhitungan Stress Intensity Factor spesimen III pada air laut / 500 cycle.

No	a (mm)	arata	arata/W	$\Delta P$	$\Delta K$
1	40				
2	40.53	40.265	0.40265	19.879	30718..9135
3	40.72	40.625	0.40625	19.879	31013..99343
4	41.22	40.97	0.4097	19.879	31300.46012
5	41.79	41.505	0.41505	19.879	31752.05711
6	42.46	42.125	0.42125	19.681	32257.8212
7	43.11	42.785	0.42785	19.779	32705.64044
8	43.81	43.46	0.4346	19.779	33315.96374
9	44.71	44.26	0.4426	19.779	34061.63406
10	45.65	45.18	0.4518	19.779	34951.04018
11	46.66	46.155	0.46155	19.779	35933.12391
12	47.71	47.185	0.47185	19.779	37019.3319
13	48.85	48.28	0.4828	19.779	38233.09794
14	49.95	49.4	0.494	19.779	39543.15153

Tabel 6.10 Perhitungan Stress Intensity Factor spesimen IV pada air laut/500 cycle

## 2.Perhitungan Kecepatan Perambatan Retak.

Kecepatan perambatan retak ( $da/dN$ ) dari percobaan didapat dengan membagi setiap pertambahan panjang dengan pertambahan cycle.

No	a(mm)	da (m)	dN	da/dN
1	40			
2	42	0.002	12000	0.000000166667
3	42.48	0.00048	1000	0.00000048
4	42.68	0.0002	1000	0.0000002
5	42.88	0.0002	1000	0.0000002
6	43.08	0.00012	1000	0.00000012
7	43.2	0.00012	1000	0.00000012
8	43.35	0.00015	1000	0.00000015

9	43.7	0.00035	1000	0.00000035
10	44.7	0.001	1000	0.000001
11	44.9	0.0002	1000	0.0000002
12	45.35	0.00045	1000	0.00000045
13	45.85	0.0005	1000	0.0000005
14	46.2	0.00035	1000	0.00000035
15	46.7	0.0005	1000	0.0000005
16	48	0.0013	1000	0.0000013
17	48.65	0.00065	1000	0.00000065

Tabel 6.11 Laju pertumbuhan retak spesimen I.

No	a(mm)	da(m)	dN	da/dN
1	40			
2	40.42	0.00042	6500	0.000000064615
3	40.9	0.00048	1000	0.00000048
4	41.16	0.00026	1000	0.00000026
5	41.54	0.00038	1000	0.00000038
6	41.73	0.00019	1000	0.00000019
7	42.31	0.00058	1000	0.00000058
8	42.91	0.0006	1000	0.0000006
9	43.23	0.00032	1000	0.00000032
10	43.845	0.000615	1000	0.000000615
11	44.735	0.00089	1000	0.00000089
12	45.14	0.000405	1000	0.000000405
13	46.16	0.00102	1000	0.00000102
14	47.205	0.001045	1000	0.000001045
15	48.52	0.001315	1000	0.000001315
16	51.92	0.0034	1000	0.0000034

Tabel 6.12 Laju perambatan retak spesimen II.

No	a(mm)	da(m)	dN	da/dN
1	40			
2	40.45	0.00045	6500	0.000000069231
3	41.3	0.00085	1000	0.00000085
4	41.85	0.00055	1000	0.00000055
5	42.2	0.00035	1000	0.00000035
6	42.8	0.0006	1000	0.0000006
7	43.1	0.0003	1000	0.0000003
8	43.5	0.0004	1000	0.0000004
9	44	0.0005	1000	0.0000005
10	44.7	0.0007	1000	0.0000007
11	45.25	0.00055	1000	0.00000055
12	46	0.00075	1000	0.00000075
13	47	0.001	1000	0.000001
14	47.8	0.0008	1000	0.0000008
15	48.2	0.0004	1000	0.0000004
16	49.1	0.0009	1000	0.0000009

Tabel 6.13 Laju perambatan retak spesimen III.

No	a(mm)	da(m)	dN	da/dN
1	40			
2	40.53	0.00053	10000	0.000000053
3	40.72	0.00015	1000	0.00000015
4	41.22	0.0005	1000	0.0000005
5	41.79	0.00057	1000	0.00000057
6	42.46	0.00067	1000	0.00000067
7	43.11	0.00065	1000	0.00000065
8	43.81	0.0007	1000	0.0000007
9	44.71	0.0009	1000	0.0000009
10	45.65	0.00094	1000	0.00000094
11	46.66	0.00101	1000	0.00000101
12	47.71	0.00105	1000	0.00000105
13	48.85	0.00114	1000	0.00000114
14	49.85	0.0011	1000	0.0000011

Tabel 6.14 Laju perambatan retak spesimen IV.

## GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK.

Berdasarkan hasil pengujian maka akan didapatkan grafik laju perambatan retak dengan berdasar pada rumus Paris - Erdogan :

$$\frac{da}{dN} = c (\Delta K)^m \quad [6.9]$$

Data-data  $da/dN$  dengan  $\Delta K$  diberikan dalam bentuk logaritma, dan dibuat grafik laju perambatan retak dengan  $da/dN$  sebagai ordinat dan  $\Delta K$  sebagai absis.

## TABEL PERAMBATAN RETAK.

Spesimen I

Log $\Delta K$	Log $da/dN$
4.49402	-6.67798
4.49304	-6.31876
4.49704	-6.69897
4.51488	-6.69897
4.51725	-6.69897
4.50909	-6.92082
4.50754	-6.82391
4.52593	-6
4.55207	-6.69897
4.52591	-6.34679
4.55014	-6.30103
4.5554	-6.45593
4.5607	-6.30103
4.57205	-5.88605
4.58455	-6.18701

Spesimen II

Log $\Delta K$	Log $da/dN$
4.49775	-6.18977
4.49656	-6.31876
4.50722	-6.58503
4.48036	-6.42022
4.46045	-6.72125
4.47813	-6.23657
4.49964	-6.22185
4.5145	-6.49485
4.51945	-6.21112
4.52859	-6.65061
4.53865	-6.39254
4.55174	-5.99139
4.5624	-5.98088
4.58599	-5.88107
4.60615	-5.46852



Spesimen III

Log $\Delta K$	Log da/dN
4.50678	-7.16115
4.48822	-6.34679
4.49855	-6.25964
4.51459	-6.45593
4.50722	-6.22185
4.51908	-6.52288
4.52105	-6.39794
4.52863	-6.30103
4.5444	-6.1549
4.54345	-6.25964
4.55572	-6.12493
4.56659	-6
4.56713	-6.09691
4.57915	-6.39794
4.58539	-6.04576

Spesimen IV

Log $\Delta K$	Log da/dN
4.48741	-7.2757
4.4955	-6.72124
4.49555	-6.30102
4.50177	-6.24413
4.50863	-6.18708
4.51462	-6.18708
4.52265	-6.1549
4.53226	-6.04576
4.54346	-6.02687
4.55549	-5.99568
4.56843	-5.97881
4.58244	-5.94309
4.59707	-5.95861

## **BAB VII**

### **ANALISA HASIL PERCOBAAN**

#### **VII.1. PENDAHULUAN**

Pada bab ini akan dilakukan penganalisaan dari hasil percobaan. Analisa dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan dari pengujian, dengan berdasarkan teori yang telah ada dan perbandingan dengan hasil penelitian lain. Sehingga dengan analisa ini akan diketahui perbandingan leleh korosi pada dua material yang diuji.

Analisa dilakukan terhadap :

1. Analisa hasil perambatan retak.
2. Analisa grafik perambatan retak.
3. Analisa konstanta  $m$ .
4. Analisa beban dan proses kimia yang terjadi.

#### **VII.2. ANALISA HASIL PERAMBATAN RETAK**

Dari semua percobaan yang telah dilakukan, perlu diketahui rentang perambatan retak. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui apakah hasil percobaan masuk dalam kriteria yang dapat dihitung dengan rumus Paris Edorgan. Perhitungan rentang perambatan retak maksimum dan minimum dilakukan untuk semua spesimen. Dan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Pengujian	da / dN maksimum	da / dN minimum
Spesimen I (udara normal)	1.3E-06	1.19E-7
Spesimen II (udara normal)	3.31E-6	1.9E-07
Spesimen I (air laut)	1E-06	6.69E-07
Spesimen II (air laut)	1.14E-06	1.9E-07

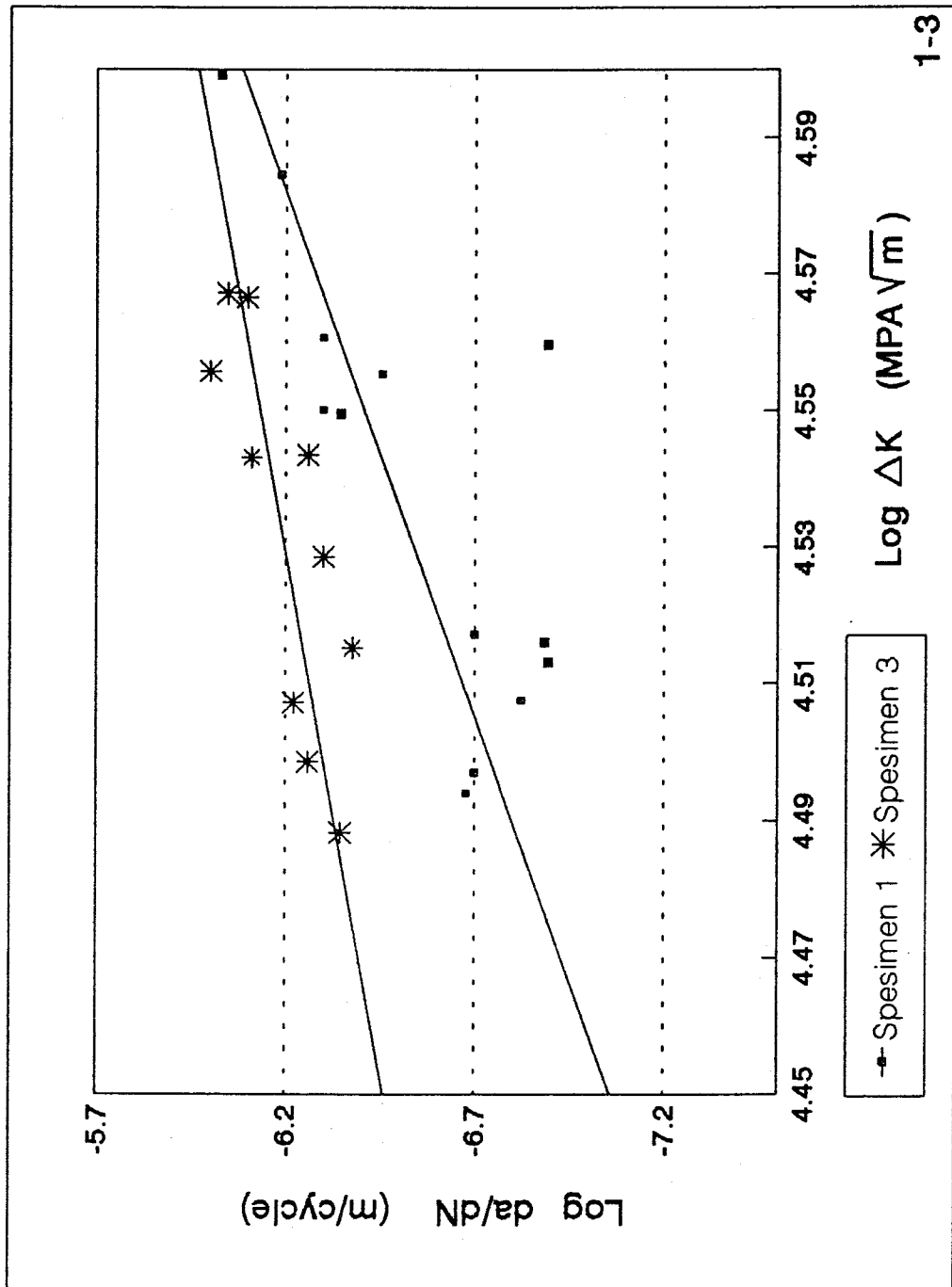
Harga da/dN yang didapat terletak dalam rentang antara  $10\text{E-}07$  sampai  $10\text{E-}06$  m/cycle.

Menurut rumus Paris Edorgan yang berlaku untuk perambatan retak daerah tengah (intermediate). Maka data yang didapat akan sah bila memenuhi persyaratan daerah tengah (region B) bila berada dalam rentang antara  $10^{-8}$  sampai  $10^{-6}$  atau  $10^{-5}$  sampai  $10^{-3}$  m/cycle.

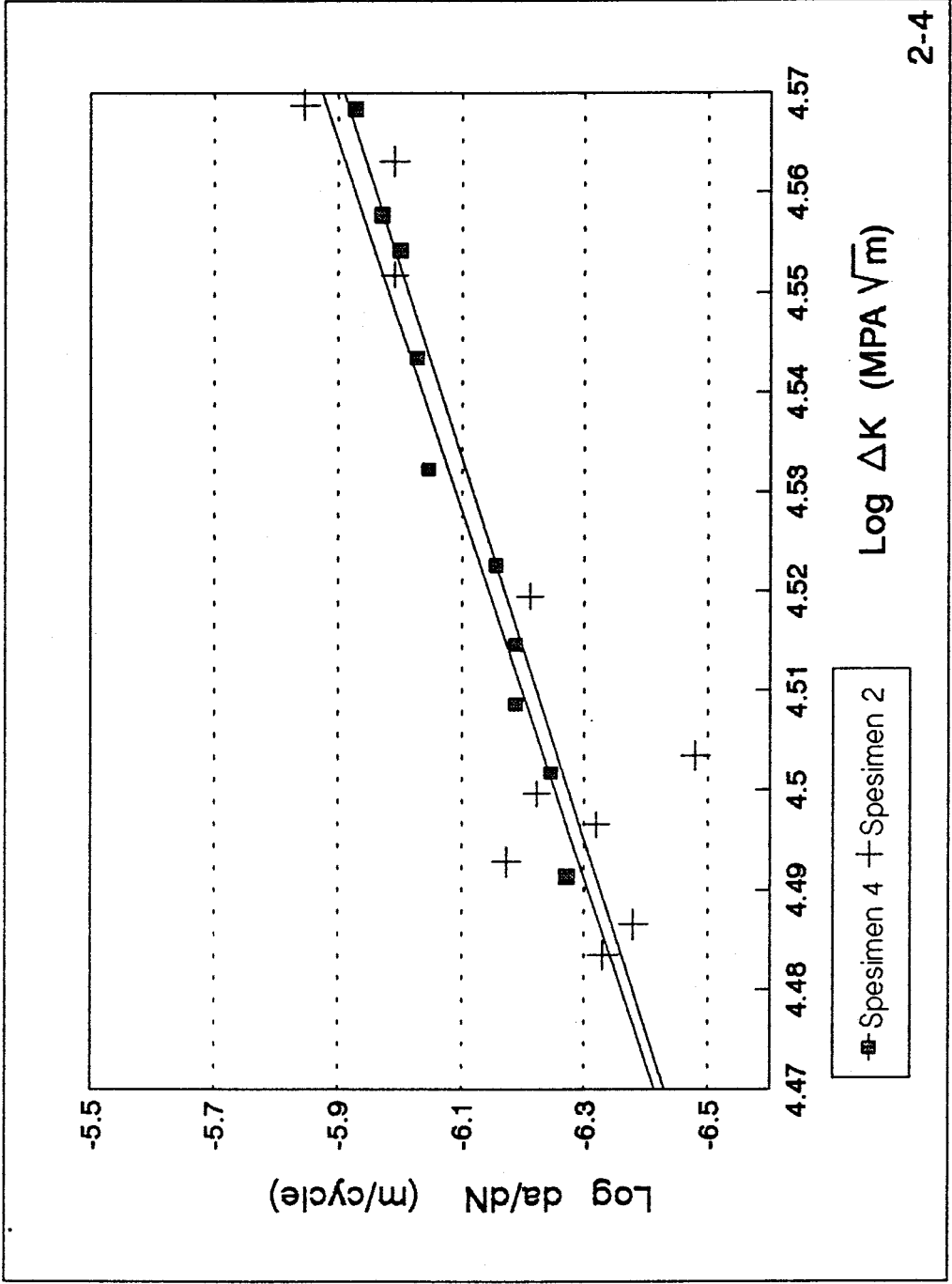
Dari perbandingan data maksimum dan minimum dari data-data percobaan diketahui bahwa laju perambatan retak berada dalam rentang yang diharapkan. Sehingga rumus Paris-Edorgan dapat diterapkan terhadap hasil percobaan tersebut.

## VII.2. ANALISA GRAFIK PERTAMBAHAN RETAK

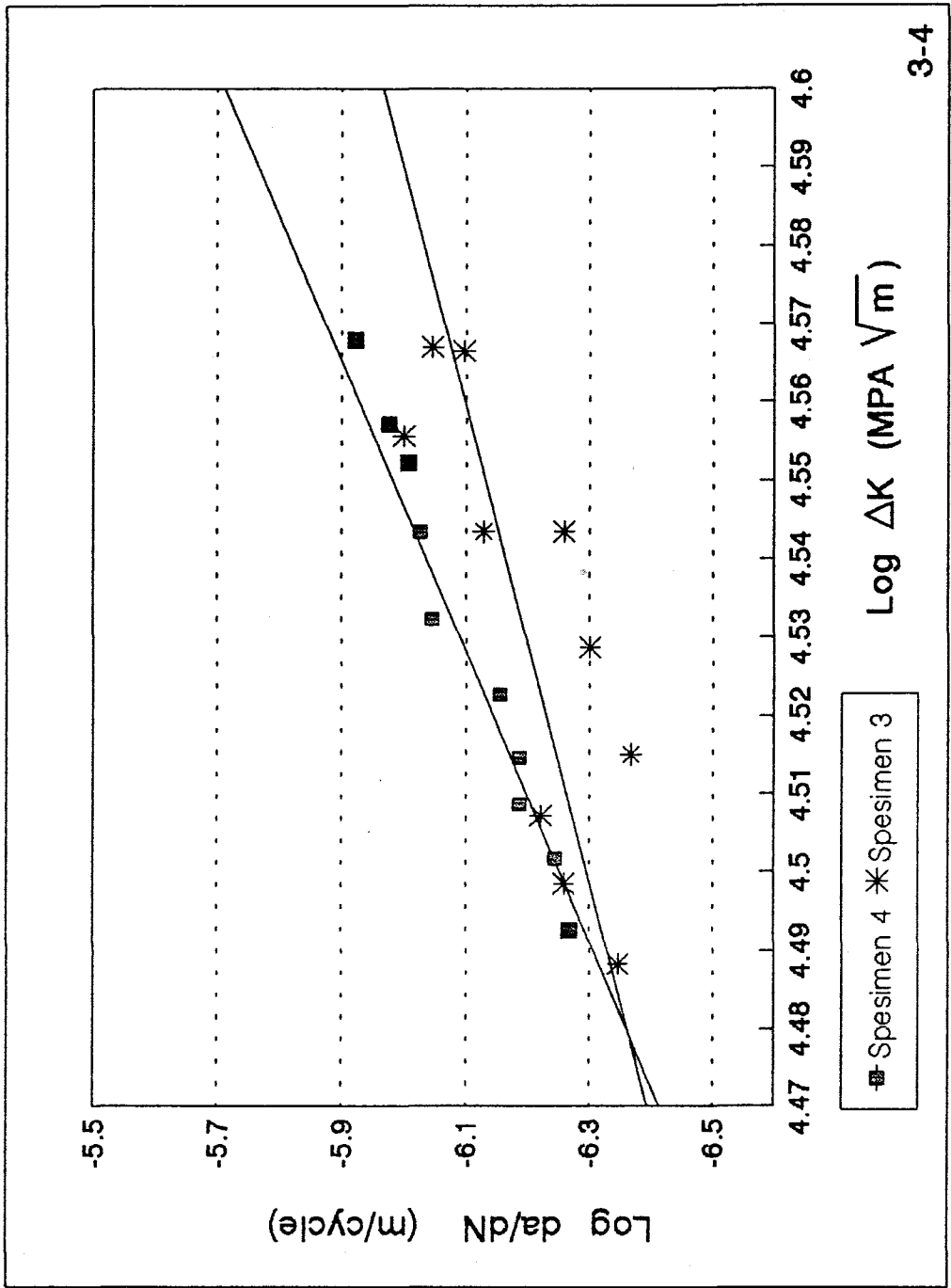
Grafik perambatan retak adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kecepatan pertumbuhan retak dengan rentang faktor intensitas tegangan, sehingga dari grafik tersebut dapat diperkirakan harga perambatan retak, da/dN untuk nilai SIF tertentu.



Gambar 7.1 Grafik laju perambatan retak spesimen 1 pada kondisi udara normal dan air laut



Gambar 7.2 Grafik laju perambatan retak spesimen II pada kondisi udara normal dan air laut



Gambar 7.3 Grafik perbandingan laju perambatan retak spesimen I dan II pada kondisi air laut

---

### **1. Grafik pertumbuhan retak pada kondisi udara normal dan kondisi korosif.**

Dari pembacaan grafik laju perambatan retak, pada baja lunak kecepatan perambatan retak lebih besar pada spesimen yang disemprot air laut. Pada baja diperkuat pengaruh air laut tidak terlalu besar terhadap kecepatan perambatan retak, sehingga bila dibandingkan dengan spesimen yang diuji pada udara normal hasilnya tidak terlalu besar. Dalam grafik tersebut terlihat bahwa pada harga  $\Delta K$  yang sama, harga perambatan retak  $da/dN$  pada pengujian tanpa pengaruh korosif mempunyai harga lebih kecil bila dibandingkan pengujian dengan adanya pengaruh korosif.

Fenomena yang terjadi pada spesimen pertama sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Vosikovsky [13] (Gambar 5.15) dimana terlihat penurunan pengaruh air laut dengan pengurangan kecepatan perambatan retak. Maka melihat hasil percobaan Vosikovsky menunjukkan fenomena yang sama dengan hasil pengujian ini.

### **2. Perbandingan grafik kecepatan perambatan retak dari baja lunak dan baja diperkuat pada kondisi korosi.**

Dari grafik perbandingan tersebut tampak bahwa kecepatan perambatan retak korosi baja lunak lebih rendah dibanding kecepatan perambatan retak korosi pada baja yang diperkuat

Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa semakin tinggi Yield Strength yang dimiliki material, semakin rendah fracture toughnessnya (ketahanan terhadap retak) sehingga kegagalan lebih mudah terjadi. Pada bab III, dapat dilihat pengaruh Yield Strength terhadap fracture toughness.

Sifat lelah retak korosi dipengaruhi material dan lingkungan [bab IV]. Struktur material dan kandungan elemen dalam material mempunyai pengaruh dalam karakteristik kelelahan ini. Penambahan unsur karbon dalam baja akan meningkatkan kekuatan, kekerasan sekaligus menurunkan keuletan baja [Bab II] dan ketahanannya terhadap lelah korosi. Pada Bab V ditunjukkan pengaruh kandungan karbon pada baja terhadap kecepatan terjadinya korosi.

Baja C1045 yang memiliki tegangan luluh tinggi dan mengandung karbon lebih tinggi, mempunyai ketahanan terhadap kelelahan korosi yang lebih rendah dibanding baja lunak (Mild Steel).

### **VII.3. ANALISA KONSTANTA $m$**

#### **VII.3.1. Analisa nilai Gradien**

Berdasarkan pada hasil perhitungan Bab VI.4 yang kemudian diplotkan dalam grafik logaritma, didapat persamaan regresi linier untuk masing-masing pengujian, yaitu :

- Spesimen I pada pengujian udara normal

$$Y = 5.082X - 29,56$$

- Spesimen II pada pengujian udara normal



$$Y = 5.201X - 29,68$$

- Spesimen I pada pengujian dilakukan dengan penyemprotan air laut

$$Y = 3.004X - 19,82$$

- Spesimen II pada pengujian dilakukan dengan penyemprotan air laut

$$Y = 5.42X - 30,64$$

Dari persamaan-persamaan di atas dapat kita lihat perbedaan gradien dari tiap persamaan yang didapat dari tiap percobaan. Dimana nilai dari gradien akan mempengaruhi pola besarnya kenaikan laju perambatan retak untuk masing-masing perlakuan pengujian dan spesimen yang berbeda.

Semakin besar nilai gradien atau kecenderungan semakin naik, maka pertambahan  $da/dN$  juga semakin besar. Sebaliknya nilai gradien yang kecil kecenderungan pertambahan  $da/dN$  kecil.

Dari pengertian di atas dapat dilakukan analisa sebagai berikut :

### **1. Pengujian pada udara normal.**

Dari pendekatan grafik (regresi linier) didapat pada pengujian diudara normal mempunyai kecenderungan naik yang semakin tajam, dimana pada baja kekuatan tinggi mempunyai kecenderungan naik yang lebih besar dibanding baja lunak, sehingga memiliki nilai pertambahan  $da/dN$  yang semakin besar.

### **2. Pengujian dengan penyemprotan air laut.**

Pada persamaan grafik regresi yang didapatkan dari pengujian baja kekuatan tinggi mempunyai gradien yang lebih besar dibanding baja lunak.

#### **Fenomena yang dapat dijelaskan adalah :**

Pada pengujian dengan penyemprotan air laut (pengaruh korosi air laut) akan mengalami suatu kondisi yang disebut fatigue korosi, dimana lingkungan korosif mempengaruhi penjalaran retak. Pada nilai rentang faktor intensitas tertentu, dari grafik yang dihasilkan pada baja lunak pertambahan retak ( $da/dN$ ) tidak terlalu besar dibanding pada kondisi udara normal. Seperti percobaan yang dilakukan oleh Vosikovsky[13] (gambar 5.15) yang memperlihatkan adanya kecenderungan penurunan pengaruh air laut dengan pengurangan kecepatan retak.

#### **VII.3.2. Analisa Konstanta m**

Dari semua percobaan yang telah dilakukan, dihasilkan :

- Spesimen I (udara normal), harga  $m = 5,082$
- Spesimen II (udara normal), harga  $m = 5,201$
- Spesimen I (air laut), harga  $m = 3,004$
- Spesimen II (air laut), harga  $m = 5,4201$

Dengan nilai konstantan yang dihasilkan dari percobaan masih dalam rentang yang diijinkan yaitu antara 2 - 5. Sehingga dengan harga  $m$  yang

lebih dari, berarti retak kelelahan yang terjadi berdasarkan ada kerusakan kumulatif (kumulatif damage) pada daerah plastis didepan ujung retak yaitu apabila kepecahan yang dihasilkan oleh suatu proses secara mikro, dimana daerah plastis balik kira-kira berukuran sama dengan proses kepecahan yang terjadi [Bab III].

## **VII.4. ANALISA BEBAN DAN REAKSI KIMIA**

### **VII.4.1. Analisa Beban Yang Terjadi**

- Dengan adanya beban lelah yang dikenakan pada spesimen, maka tegangan tarik akan membuka ujung retak dan memberi kesempatan elektrolit untuk masuk.
- Penghilangan selaput tipis oksida pada ujung retak terjadi akibat slip sesar (undakan sesar). Undakan sesar terjadi pada material akibat adanya beban berulang, dengan terkikisnya lapisan pelindung ini membuat bagian itu lebih anodik dibanding daerah sekitarnya. [Bab V]
- Tegangan akan memberikan kekenyalan pada daerah ujung retak, yang akan memperbesar sifat anodik daerah ujung retak.

### **VII.4.2. Analisa Proses Kimia pada Ujung Retak**

Dari analisa kecepatan perambatan retak, pada rentang intensitas tertentu, spesimen yang disemprot dengan air laut mempunyai pertambahan yang tinggi, hal ini dapat dijelaskan dengan :

### **1. Hidrogen Embrittlement**

Dari proses korosi permukaan terjadi penguraian Hidrogen menjadi ion-ion hidrogen ( $H^+$ ), yang kemudian akan berdifusi ke dalam baja, terutama pada takikan.

Didaerah ujung retak pada siklus-siklus tertentu akan terbuka yang dapat lebih cepat dipengaruhi kondisi korosif. Karena pengaruh kondisi korosif, ujung retak akan menjadi lebih anodik dibanding daerah sekitarnya.

Kondisi korosif ini dapat juga terjadi akibat adanya slip step yang akan menyingkap lapisan tipis oksida, sebagai pelindung terhadap korosi. Dari kondisi tersebut maka pada daerah ujung retak akan lebih cepat terkorosi, sehingga mempunyai dampak terhadap laju perambatan retak yang semakin cepat.

### **2. Formasi Lubang Kecil pada Retak Fatigue**

Proses formasi lubang kecil ini terbagi mejadi beberapa tahapan, yaitu :

#### **1. Tahap I**

Terjadi reaksi elektrokimia awal selama fatigue dalam air laut.

#### **2. Tahap II**

Perpindahan ion  $\text{Cl}^-$  dari air laut, yang masuk dalam retakan menyebabkan susunan  $\text{FeCl}_2$  akan dihidrolisa dan membentuk ion  $\text{H}^+$  dan ion  $\text{Cl}^-$ .

### **3. Tahap III**

Terjadinya hidrogen embrittlement yang disebabkan formasi H dari ion  $\text{H}^+$  yang dibentuk pada tahap II.

### **4. Tahap IV**

Pelebaran retak pada tahap I,II, dan III akibat disolusi.

## **BAB VIII**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **VIII.1. KESIMPULAN**

Dari hasil pelaksanaan pengujian yang telah dilakukan analisa dan perbandingan dengan hasil pengujian beberapa ahli, maka dapat ditarik kesimpulan :

- Pada eksperimen yang dilakukan pada baja lunak dan baja kekuatan tinggi dihasilkan, pada kondisi pengujian diudara normal didapat bahwa kecepatan perambatan retak untuk baja kekuatan tinggi lebih tinggi dibanding baja lunak.
- Pada kondisi pengujian yang bersifat korosif kecepatan perambatan retak baja kekuatan tinggi lebih tinggi dibanding baja lunak.
- Besarnya kekuatan baja, khususnya kekuatan luluhnya berpengaruh terhadap ketahanan baja terhadap kelelahan. Semakin tinggi tegangan luluh yang dimiliki baja, semakin berkurang kemampuan baja menahan beban berulang yang mengakibatkan terjadinya kelelahan. Pada kondisi yang korosif pengaruh tegangan luluh terhadap ketahanan terhadap laju perambatan retak lebih besar.

- Kecepatan perambatan retak untuk spesimen yang sama dengan kondisi lingkungan yang berbeda mengalami percepatan perambatan yang berbeda pada rentang intensitas tegangan tertentu.
- Dari konstanta  $m$  yang didapat, diketahui bahwa perambatan terjadi berdasar pada kerusakan kumulatif pada daerah plastis di depan ujung retak, dan retak ini disebabkan oleh proses mikro.
- Adanya ion-ion agresor yang terkandung dalam air laut seperti  $\text{Cl}^-$  dan ion  $\text{H}^+$  akan terjadi reaksi kimia yang bersifat korosif. Sehingga mengakibatkan pengujian kelelahan terhadap pengaruh air laut yang dilakukan memiliki laju pertambahan retak yang lebih tinggi dari pengujian kelelahan pada udara normal.

## VIII.2. SARAN

Dari hasil kesimpulan yang didapat serta hambatan-hambatan yang ditemui selama pengujian kelelahan akibat pengaruh air laut, disarankan :

- Untuk setiap pelaksanaan hendaknya diperhatikan range beban pada mesin, pengikatan mur dan baut yang kuat agar material tiak bergeser.
- Perlu diadakan lebih lanjut studi tentang fatigue korosi, yaitu :
  1. Diadakan pengujian dengan kondisi pencelupan yang berbeda, seperti pencelupan penuh atau pencelupan berulang untuk mendapatkan pengaruh perlakuan yang lebih ekstrim terhadap fatigue korosi.

2. Perlu diadakan penelitian fatigue korosi untuk material yang berbeda dengan bentuk pembebanan dan frekuensi yang berbeda.
3. Diadakan penelitian dengan memakai media korosif yang lain.



## DAFTAR PUSTAKA

1. Annual Book of ASTM 1986 vol 03.01. Metal Test Methods and Analitical Procedures, 1916 Race Street Philadelphia, 1986.
2. Broek, David, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Boston, Martinus Nijhoof, 1982.
3. Broek, David, Practical Use of Fracture Mechanics, Doerdrechth, Toronto, A Wiley-intersciense Publication John Wiley & Sons, 1980.
4. Brick, R.M., Pense, A.W., Gordon R.B., Structure an Properties of Engineering Materials, fourth edition, Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., 1977.
5. Chell, C.,G., Developments in Fracture Mechanics-2 Mechanics and Mechanisme of Fracture in Metal, London, Applied Science Publisher, 1981.
6. Fuch, H.O., and Stephen, R.I., Metal Fatigue in Engineering, Toronto, A Wiley Inntersciense Publication John Wiley & Sons, 1980.
7. Fontana, M.G., Greene, N.D., Corrosion Engineering International Student Edition Mc Graw-Hill ini Materials Science and Engineering, 1983.

8. Knott, J.F., Fundamentals of Fracture Mechanics second edition, London, Butterworth, 1976.
9. Laque, Francies L., Marine Corrosion and Prevention, London, 1972.
10. Rolfe, S.T., Barsom, J.M., Fracture and Fatigue Control in Structures Application of Fracture Mechanics, Prentice-Hall Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey, 1977.
11. Schije, J., Lectures Notes On Fatigue , Static Tensile Strength an Stress Corrosion of Aircraft Materials an Structures, Delft, Report LR 360, 1982.
12. Surdia Tata, Saito Shinroku, Pengetahuan Bahan Teknik, Jakarta, Pradnya Paramita, PT., 1985.
13. Suherman, W., Diktat Kuliah Ilmu Logam, Fakultas Teknologi Industri ITS Surabaya.
14. Trethewey, K.R., Chamberlain, Corrosion for Student of Science and Engineering, Longman Group, UK Limited, 1988.
15. Van Vlack, L.H., Elements of Materials Science, London, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1976.
16. Soeweify, Diktat Kuliah Mekanika Kepecahan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS Surabaya.
17. Supomo, H., Diktat Kuliah Korosi, Fakulas Teknologi Kelautan ITS Surabaya.



**JURUSAN TEKNIK KIMIA FTI - ITS**  
**TEAM AFILIASI DAN KONSULTASI INDUSTRI**

KAMPUS ITS, SUKOLILO - SURABAYA TELP. 596240, 60652 - 60654 PES. 41

or : 2937/LTAKI/II/195  
piran : -  
nal : Hasil analisa air.

Surabaya, 24 Pebruari 1995.

Kepada:

Yth. Sdr. Beki Trilestari

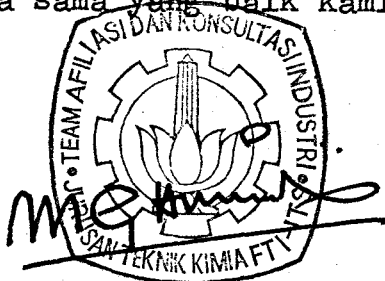
Mhs. Kapal - ITS

SURABAYA.

Memenuhi permin5aan saudara perihal pemeriksaan 1(satu) contoh air, dengan ini kami sampaikan hasil analisisnya sebagai berikut:

NaCl	,ppm	=	33198
Salinitas	,%	=	35,54
Ca	,ppm	=	363,6
Mg	,ppm	=	1083
SO <sub>4</sub>	,ppm	=	3125
pH	,ppm	=	7,7

Demikian keterangan dari kami atas kepercayaan dan kerja sama yang baik kami ucapkan terima kasih.



Ir. MUHARTO .MS

Kepala Laboratorium TAKI.

Keterangan : Hasil analisa tersebut diatas berdasarkan contoh yang kami terima.

## LAMPIRAN B

### KOMPOSISI KIMIA DAN SIFAT MEKANIK MATERIAL

#### BAJA LUNAK

Penamaan Standart	Tanda Standart	Komposisi Kimia (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Baja Lunak	SM41A	0,23	-	2,5	0,04	0,05

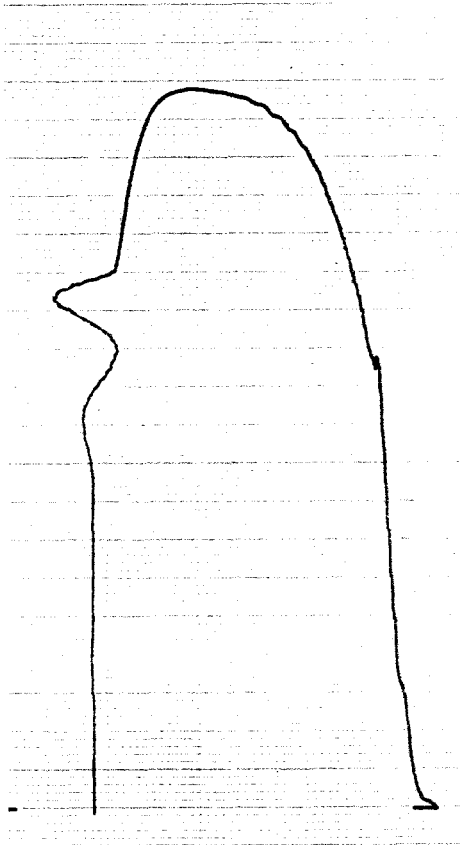
Penamaan Standart	Batas Mulur (kgf/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan Tarik (kgf/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan Batang Uji (%)
SM41A	>24	41-52	>22

#### BAJA KEKUATAN TINGGI

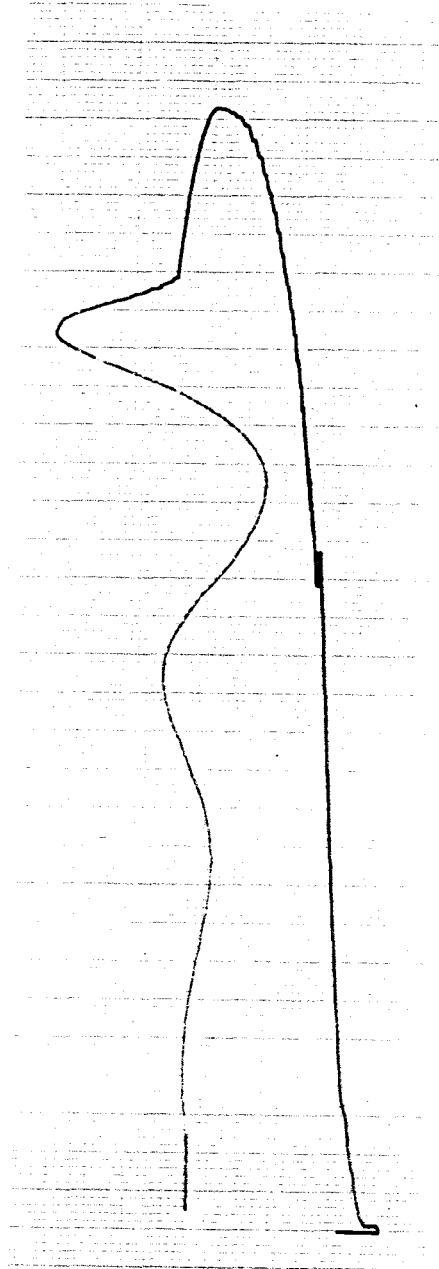
Penamaan Standart	Tanda Standart	Komposisi Kimia (%)				
		C	Si	Mn	P	S
Baja Kekuatan Tinggi	C1045 S 45 C	0,44	0,25	0,7	0,04	0,05

Penamaan Standart	Batas Mulur (kgf/mm <sup>2</sup> )	Kekuatan Tarik (kgf/mm <sup>2</sup> )	Perpanjangan Batang Uji (%)
C1045	36-44	60-90	18-22

**Grafik hasil uji tarik :**



Baja Lunak



Baja diperkuat

## **LAMPIRAN C**

### **GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK UNTUK MASING -MASING SPESIMEN**

- Grafik 1 : Grafik laju perambatan retak untuk baja lunak pada kondisi udara normal.
- Grafik 2 : Grafik laju perambatan retak untuk baja kekuatan tinggi pada kondisi udara normal.
- Grafik 3 : Grafik laju perambatan retak untuk baja lunak pada kondisi air laut.
- Grafik 4 : Grafik laju perambatan retak untuk baja kekuatan tinggi pada kondisi air laut.

